

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bruno Haraminčić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Bruno Haraminčić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. Jerolimu Andriću na savjetima, strpljenju i stručnoj pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Bruno Haraminčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BRUNO HARAMINČIĆ** Mat. br.: 0035186970

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ODREĐIVANJE OPTIMALNE GEOMETRIJE VELIKIH OTVORA U VANJSKOJ OPLATI NADGRAĐA VIŠEPALUBNIH BRODOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DETERMINATION OF OPTIMAL GEOMETRY OF LARGE OUTER SHELL OPENINGS IN SUPERSTRUCTURE OF MULTI-DECK SHIPS**

### Opis zadatka:

Suvremene višepalubne brodove (kao što su brodovi za kružna putovanja, brodovi za prijevoz stoke, Ro-Ro brodovi, itd.) karakteriziraju veliki otvori na vanjskoj oplati po cijeloj visini nadgrađa. Postojanje takvih otvora ima veliki utjecaj na raspodjelu primarnih naprezanja po visini broda i sudjelovanje nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći. Oko kutova otvora generiraju se koncentracije naprezanja, uslijed složenog smično-savojnog opterećenja, koje je potrebno što je moguće više smanjiti odabirom prikladne geometrije otvora.

### Zadatak obuhvaća:

- Za različite konfiguracije veličine otvora (duljina i visina) provesti parametarsku studiju kojom će se istražiti geometrija oko kutova otvora koja generira minimalnu koncentraciju naprezanja po slobodnom rubu otvora.
- Za istraživanje prikladne geometrije otvora generirati potreban broj modela primjenom metode konačnih elemenata (MKE) koristeći preporuke klasifikacijskog društva Lloyd Register za direktne proračune strukturnih detalja.
- Predložiti analitički izraz koji za poznatu geometriju otvora (duljinu/visinu) i slučaj opterećenja daje optimalnu geometriju u području kutova otvora.
- Predloženu geometriju u području kutova otvora testirati na primjeru višepalubnog broda za prijevoz žive stoke projektiranom u brodogradilištu ULJANIK (novogradnja 526) na način da se MKE model bočnih otvora napravljen u okviru diplomskog rada uklopi u postojeći kompletni globalni 3D MKE model dostupan na FSB-u.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....   | II  |
| POPIS TABLICA .....   | III |
| POPIS OZNAKA .....  | IV  |
| SAŽETAK .....   | V   |
| SUMMARY .....   | VI  |
| 1 UVOD .....  | 1   |
| 1.1 Motivacija za istraživanje .....  | 1   |
| 1.2 Cilj rada .....   | 2   |
| 1.3 O metodi konačnih elemenata [3] .....                                   | 2   |
| 1.4 Programski paket Femap [4] .....  | 3   |
| 2 PLAN STUDIJE I IZRADA MKE MODELA .....                                    | 4   |
| 2.1 Opći plan studije .....   | 4   |
| 2.2 MKE model .....   | 5   |
| 2.2.1 Mreža konačnih elemenata .....  | 10  |
| 2.2.2 Rubni uvjeti .....  | 13  |
| 2.2.3 Slučaj opterećenja .....  | 14  |
| 2.3 Geometrija kuta otvora „mišje uši“ .....                                | 15  |
| 3 REZULTATI .....   | 18  |
| 3.1 Obrada rezultata .....  | 18  |
| 3.2 Koeficijent redukcije naprezanja .....                                  | 20  |
| 3.3 Parametar debljine stijenke .....                                       | 20  |
| 3.4 Prikaz rezultata .....  | 21  |
| 3.5 Rezultati kuta otvora geometrije - „mišje uši“ .....                    | 22  |
| 4 TESTIRANJE NA PRIMJERU VIŠEPALUBNOG BRODA ZA PRIJEVOZ ŽIVE<br>STOKE ..... | 24  |
| 4.1 Višepalubni brod za prijevoz žive stoke .....                           | 24  |
| 4.2 Tehnički opis broda (novogradnja 526 – ULJANIK) .....                   | 25  |
| 4.3 Globalni 3D MKE model .....   | 25  |
| 4.3.1 Rubni uvjeti .....  | 26  |
| 4.3.2 Slučajevi opterećenja .....   | 27  |
| 4.3.3 Rezultati .....   | 29  |
| 4.4 Usporedba rezultata .....   | 32  |
| 5 ZAKLJUČAK .....   | 33  |
| LITERATURA .....  | 34  |
| PRILOZI .....   | 35  |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Harmony of the Seas – trenutno najveći brod za kružna putovanja na svijetu [1].....  | 1  |
| Slika 2. Prikaz geometrije otvora ( $l/a = 1$ ) .....   | 4  |
| Slika 3. Površinski model sa omjerom stranica $l/a = 1$ i $r = 0$ .....                       | 5  |
| Slika 4. Površinski model sa omjerom stranica $l/a = 2$ i $r = 0$ .....                       | 6  |
| Slika 5. Površinski model sa omjerom stranica $l/a = 3$ i $r = 0$ .....                       | 6  |
| Slika 6. Površinski model sa omjerom stranica $l/a = 4$ i $r = 0$ .....                       | 7  |
| Slika 7. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja $r = 200$ mm ( $l/a = 1$ ) .....           | 9  |
| Slika 8. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja $r = 400$ mm ( $l/a = 1$ ) .....           | 9  |
| Slika 9. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja $r = 600$ mm ( $l/a = 1$ ) .....           | 9  |
| Slika 10. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja $r = 800$ mm ( $l/a = 1$ ) .....          | 9  |
| Slika 11. Prikaz mreže elemenata detalja kuta otvora ( $r = 0$ ).....                         | 12 |
| Slika 12. Prikaz mreže elemenata detalja kuta otvora s radijusom zaobljenja ( $r = 200$ mm) . | 12 |
| Slika 13. Prikaz mreže elemenata na jednom otvoru (model $l/a = 3$ , $r = 0$ ).....           | 13 |
| Slika 14. Prikaz čvornih ograničenja pomaka (rub A) .....                                     | 14 |
| Slika 15. Prikaz čvorova opterećenih silom $F=10000$ N (rub B) .....                          | 15 |
| Slika 16. Prikaz otvora geometrije – „mišje uši“ ( $l/a = 1$ , $r = 250$ mm).....             | 16 |
| Slika 17. Diskretizirani model geometrije kuta otvora „mišje uši“ ( $r = 250$ mm) .....       | 17 |
| Slika 18. Deformirani model ( $l/a = 1$ , $r = 0$ ) .....                                     | 18 |
| Slika 19. Prikaz ekvivalentnih (Von Mises) naprezanja u detalju kuta otvora ( $r = 0$ ) ..... | 19 |
| Slika 20. Prikaz očitavanja aksijalnih naprezanja sa štapnih elemenata .....                  | 19 |
| Slika 21. Prikaz plohe redukcije naprezanja .....   | 21 |
| Slika 22. Prikaz ekvivalentnih naprezanja na geometriji kuta otvora „mišje uši“ .....         | 23 |
| Slika 23. Detaljni MKE model cijelog broda .....  | 24 |
| Slika 24. Prikaz detalja vanjske oplate nadgrađa sa otvorima .....                            | 26 |
| Slika 25. Rubni uvjeti za globalni model cijelog broda .....                                  | 27 |
| Slika 26. Distribucija vertikalnog momenta savijanja za LC1 .....                             | 28 |
| Slika 27. Deformirani model detalja otvora vanjske oplate nadgrađa .....                      | 30 |
| Slika 28. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 300$ mm) .....          | 31 |
| Slika 29. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 400$ mm) .....          | 31 |
| Slika 30. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 500$ mm) .....          | 31 |
| Slika 31. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 0$ mm) .....            | 32 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Prikaz svih modela i njihovih karakteristika .....                | 8  |
| Tablica 2. Opis čvornih ograničenja pomaka za sve modele .....               | 13 |
| Tablica 3. Opis čvornih opterećenja za sve modele .....                      | 14 |
| Tablica 4. Karakteristike modela geometrije kuta otvora – „mišje uši“ .....  | 17 |
| Tablica 5. Koeficijent redukcije naprezanja ovisno o debljini stijenke ..... | 20 |
| Tablica 6. Koeficijent redukcije naprezanja za sve modele .....              | 21 |
| Tablica 7. Rezultati otvora geometrije – „mišje uši“ .....                   | 22 |
| Tablica 8. Tehnički opis broda (novogradnja 526) .....                       | 25 |
| Tablica 9. Iznosi Von Mises naprezanja u sva 4 kuta otvora .....             | 29 |
| Tablica 10. Iznosi naprezanja u kutu 1 (globalni 3D model broda) .....       | 30 |
| Tablica 11. Prikaz rezultata – $K_{RN}$ (globalni 3D model) .....            | 30 |
| Tablica 12. Usporedba rezultata .....  | 32 |

**POPIS OZNAKA**

| Oznaka        | Jedinica          | Opis  |
|---------------|-------------------|---|
| $s$           | mm                | razmak između okvira                            |
| $h$           | mm                | razmak između paluba                            |
| $l$           | mm                | duljina otvora                                  |
| $a$           | mm                | visina otvora                                   |
| $t$           | mm                | debljina stijenke (konačnog elementa)           |
| $\sigma$      | N/mm <sup>2</sup> | aksijalno naprezanje                            |
| $x$           | mm                | udaljenost središta luka od bočnog ruba otvora  |
| $y$           | mm                | udaljenost središta luka od gornjeg ruba otvora |
| $r$           | mm                | radijus   |
| $d$           | mm                | širina MKE modela                               |
| $v$           | mm                | visina MKE modela                               |
| $K_{RN}$      | -                 | koeficijent redukcije naprezanja                |
| $A (l/a)$     | -                 | omjer veličine otvora                           |
| $B (r/a)$     | -                 | omjer radijusa i visine otvora                  |
| $\sigma_{VM}$ | N/mm <sup>2</sup> | Von Mises ekvivalentno naprezanje               |
| $\sigma_x$    | N/mm <sup>2</sup> | aksijalno naprezanje                            |



## SAŽETAK

Suvremene višepalubne brodove (kao što su brodovi za kružna putovanja, brodovi za prijevoz stoke, Ro-Ro brodovi itd.) karakteriziraju veliki otvori na vanjskoj oplati po cijeloj visini nadgrađa. Postojanje takvih otvora ima veliki utjecaj na raspodjelu primarnih naprezanja po visini broda i sudjelovanje nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći. Oko kutova otvora generiraju se koncentracije naprezanja uslijed složenog smično-savojnog opterećenja, koje je potrebno što je moguće više smanjiti odabirom prikladne geometrije otvora.

U radu je provedena parametarska studija kojom se istražila geometrija oko kutova otvora. Za studiju su generirani parcijalni 2D modeli vanjske oplata nadgrađa primjenom metode konačnih elemenata (MKE) u programskog paketu Femap te je analiziran njihov odziv. Sukladno rezultatima studije, odabrano je nekoliko različitih geometrija otvora te su testirani na primjeru višepalubnog broda za prijevoz žive stoke projektiranom u brodogradilištu ULJANIK (novogradnja 526). Usporedbom rezultata izvedeni su zaključci o primjenjivosti rezultata studije izvedene na parcijalnom modelu sa jednostavnim slučajem opterećenja na globalni 3D model broda sa realnim slučajevima opterećenja.

Ključne riječi: višepalubni brodovi, otvori, metoda konačnih elemenata (MKE)

## **SUMMARY**

The ship structure of modern multi-deck ships (e.g. cruise ships, livestock carriers, Ro-Ro ships etc.) is characterized by large openings in the shell plating of the superstructure. Such openings have great influence on primary stress distribution over the ship overall depth and longitudinal ship strength. Due to a combination of shear-bending load, high stresses are concentrated around corners of the large openings, which should be decreased by choosing the proper geometry of the opening.

This thesis presents a parametric study which is carried out to investigate the geometry around the corners of the openings. Partial 2D models of the superstructure side shell plating have been generated using the finite element method (FEM) and the response of the models has been analysed. The results were tested on a livestock carrier designed in the ULJANIK shipyard (newbuilding 526). Conclusions about the applicability of this study were made by comparing the results of the study to the results of the test performed on a global 3D FEM model of the ship which includes a realistic load case.

Key words: multi-deck ships, large openings, finite element method (FEM)

# 1 UVOD

## 1.1 Motivacija za istraživanje

Suvremene višepalubne brodove (kao što su brodovi za kružna putovanja, brodovi za prijevoz stoke, Ro-Ro brodovi, itd.) karakteriziraju veliki otvori na vanjskoj oplati po cijeloj visini nadgrađa. Postojanje takvih otvora ima veliki utjecaj na raspodjelu primarnih naprezanja po visini broda i sudjelovanje nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći. Oko kutova otvora generiraju se koncentracije naprezanja, uslijed složenog smično-savojnog opterećenja, koje je potrebno što je moguće više smanjiti odabirom prikladne geometrije otvora.

Zadnjih nekoliko desetljeća primjetan je značajni napredak u konstrukciji brodova za kružna putovanja, tzv. kruzera. Postaju masivne ploveće strukture rastući ne samo u duljinu, nego i u visinu. Zbog ekonomskih razloga, odnosno želje za porastom profita brodovlasnika, raste broj putnika i članova posade što dovodi do iznimno velikih brodova, zapremnine preko 220 000 BT sa više od 8000 putnika i članova posade (Slika 1). Veći brod nudi više usluga i komfora za putnike što je na današnjem zahtjevnom tržištu kružnih putovanja od velike važnosti.



Slika 1. Harmony of the Seas – trenutno najveći brod za kružna putovanja na svijetu [1]

Problematika velikih putničkih brodova za kružna putovanja leži u kombinaciji zahtjeva za čvrstoćom i zahtjeva za stabilitetom. Zadovoljenje uzdužne čvrstoće izazovan je i složen posao zbog njihovih konstrukcijskih zahtjeva, visina nadgrađa, otvorene gornje palube (balkoni, prozori), veliki recesi (diskontinuiteti u strukturi), te prostorija kao što su velike dvorane, kina, kazališta itd. Radi relativno plitkog gaza te vrste brodova, oko  $8 \div 8,5$  m, a zbog njihove visine, javlja se problem kod zahtjeva za stabilitetom, točnije kod vertikalnog položaja težišta mase. Kako bi se udovoljilo tim zahtjevima gornje palube moraju biti što lakše, tj. što manjih dimenzija, [2].

Posljednji trend su veliki balkonski otvori u svakoj sobi za putnike koji predstavljaju slabe točke u strukturi. Posebno na mjestima visokih naprezanja, daleko od položaja neutralne osi poprečnog presjeka strukture, gdje se generiraju visoke koncentracije naprezanja zbog velikih otvora.

## 1.2 Cilj rada

Cilj ovog rada je za različite konfiguracije otvora (duljina i visina) provesti parametarsku studiju kojom će se istražiti geometrija oko kutova otvora koja generira minimalnu koncentraciju naprezanja po slobodnom rubu otvora. Također, predložena geometrija u području kutova otvora testirati će se na primjeru višepalubnog broda za prijevoz žive stoke projektiranom u brodogradilištu ULJANIK (novogradnja 526) na način da se MKE model bočnih otvora napravljen u okviru diplomskog rada uklopi u postojeći kompletni globalni 3D MKE model dostupan na FSB-u.

## 1.3 O metodi konačnih elemenata [3]

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na toj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Njihovo korištenje nerijetko se svodi na zadavanje ulaznih podataka prema propisanim uputama, a dobivena rješenja, koja svojim grafičkim prikazom fasciniraju korisnike, prihvaćaju se bez dovoljno kritičnosti. Računalni program shvaća se kao crna kutija

(eng. *Black-Box*) u kojoj je skrivena složena teorija koja se smatra nepotrebnom za rješavanje inženjerskih problema. Takav pristup može dovesti do pogrešne procjene stanja naprezanja i deformacije u konstrukciji, a to može ugroziti njezinu čvrstoću i stabilnost.

Metoda konačnih elemenata približna je numerička metoda. Svaki njezin korisnik treba imati na umu da su dobivena rješenja približna, a realnim vrijednostima mogu se približiti samo uz pravilan izbor proračunskog modela i uz pravilno odabrane konačne elemente koji su u mogućnosti opisati realni proces deformiranja. Kako bi to bilo moguće, potrebno je razumjeti fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata, a na taj način i ograničenja njihove primjene. Osim toga, korisnik mora biti u stanju kritički analizirati dobivene rezultate.

#### **1.4 Programski paket Femap [4]**

Femap [5] je napredni inženjerski simulacijski paket (CAE) koji vrši analize metodom konačnih elemenata za složene tehničke proizvode i sustave. Kao vodeći predprocesor i postprocesor za analizu metodom konačnih elementa, koji u Windows okruženju ima daleko najviše korisnika, Femap za potrebe proračuna uključuje vodeće NX Nastran algoritme, koje je Siemens dodatno nadopunio, najviše u području kontaktnih i nelinearnih problema.

Ima ugrađene translateore za preuzimanje geometrije iz svih vodećih CAD programa, kao što su Solid Edge, NX, Pro/E, Catia, Solid Works, Inventor, AutoCAD itd. Također na raspolaganju su svi potrebni alati za kreiranje krivulja, površina i tijela. Priprema geometrije za različite vrste analiza je zato brza i jednostavna.

FEMAP uključuje optimiziranje zadanih parametara za kreiranje FE mreže, ovisno o tipu i obliku geometrije. Sa dodatnim parametrima može korisnik, već prema vlastitom iskustvu kod kreiranja FE mreža, dodatno utjecati na kvalitetu mreže konačnih elemenata.

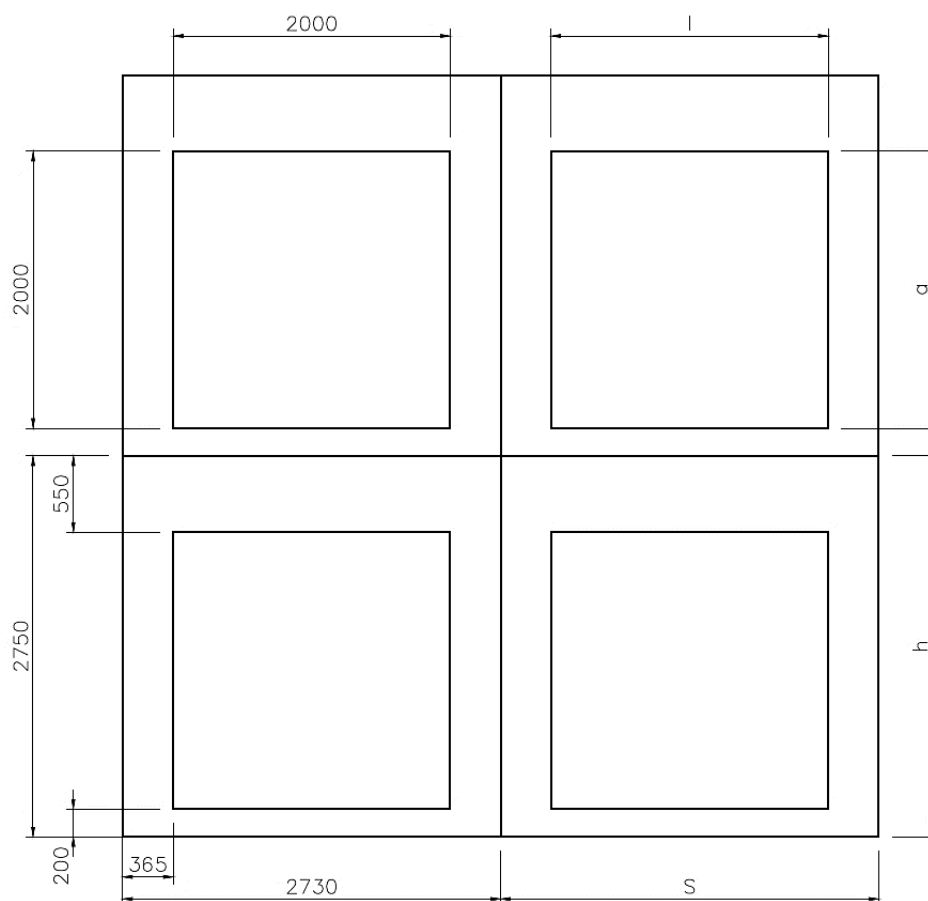
## 2 PLAN STUDIJE I IZRADA MKE MODELA

### 2.1 Opći plan studije

Za provedbu studije odabran je tipični strukturni detalj vanjske oplata nadgrađa broda za kružna putovanja slijedećih dimenzija (Slika 2):

- razmak između okvira, s: 2730 mm
- razmak između paluba, h: 2750 mm.

Parametri koji se variraju su veličina otvora (duljina i visina) i radijus zaobljenja kuta otvora. Omjer duljine i visine ( $l/a$ ) se varira od vrijednosti 1 do 4 dok se omjer radijusa i visine ( $r/a$ ) varira od vrijednosti 0,1 do 0,5.

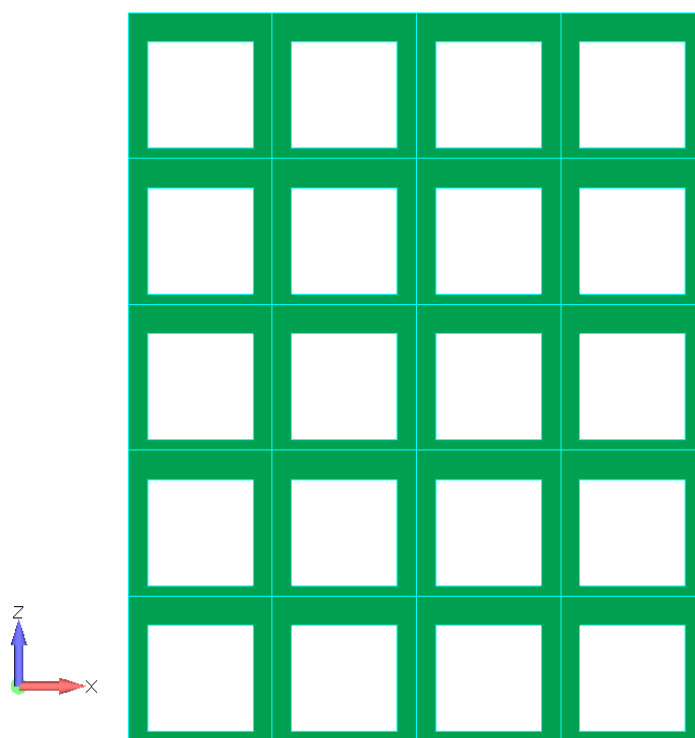


Slika 2. Prikaz geometrije otvora ( $l/a = 1$ )

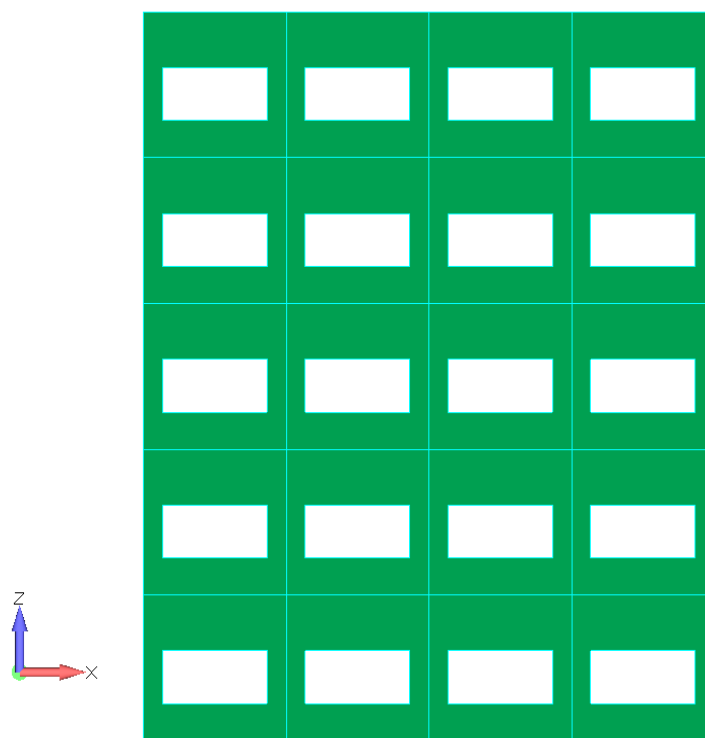
## 2.2 MKE model

Za izradu MKE modela odabran je programski paket Femap sa NX Nastran rješavačem dostupan na Fakultetu. Pri generiranju mreže konačnih elemenata, korištene su preporuke klasifikacijskog društva Lloyd's Register [6] za direktne proračune strukturnih detalja.

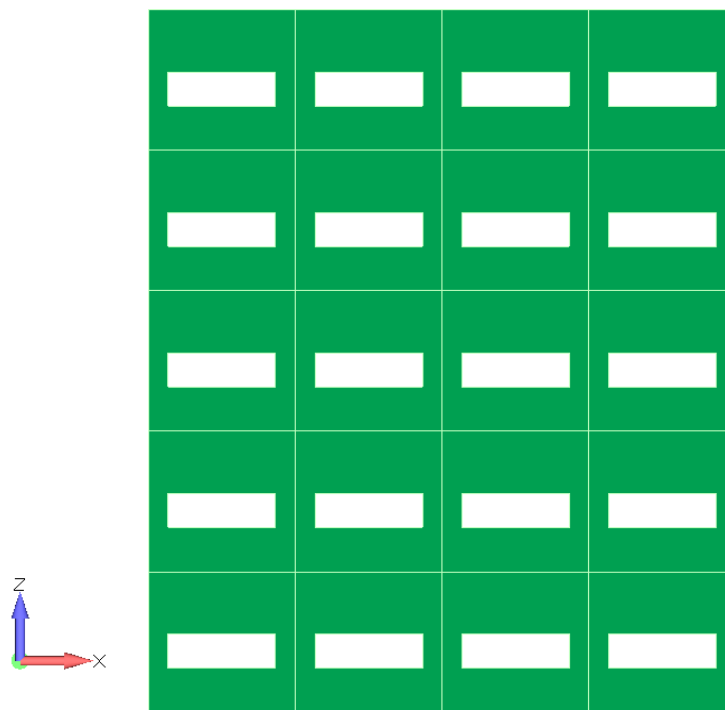
Da se eliminira utjecaj rubnih uvjeta i opterećenja, model obuhvaća strukturu između 4 okvira i 5 paluba. Na slijedećim slikama (Slika 3 - Slika 6) prikazana su 4 osnovna površinska modela sa pravokutnim otvorima sa različitim omjerima duljine i visine otvora.



Slika 3. Površinski model sa omjerom stranica  $l/a = 1$  i  $r = 0$

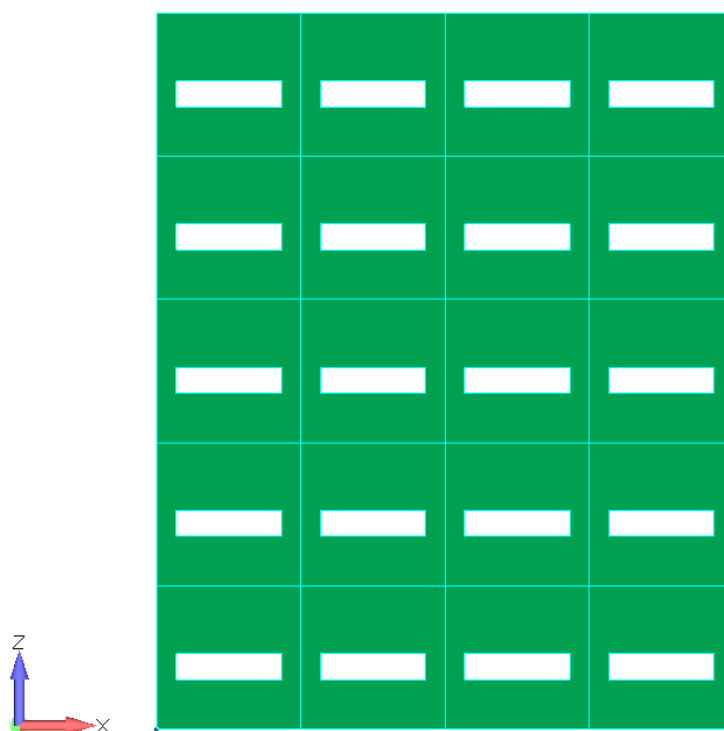


Slika 4. Površinski model sa omjerom stranica  $l/a = 2$  i  $r = 0$



Slika 5. Površinski model sa omjerom stranica  $l/a = 3$  i  $r = 0$





**Slika 6. Površinski model sa omjerom stranica  $l/a = 4$  i  $r = 0$**

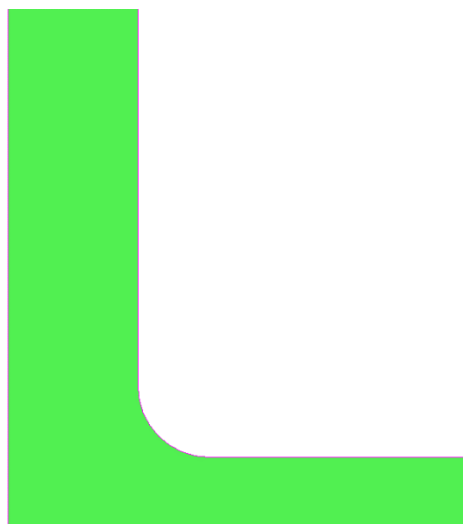
Ukupna dimenzije svih modela su jednake te iznose:

- širina modela, d: 10920 mm
- visina modela, v: 13750 mm.

Tablica 1 prikazuje popis svih modela sa njihovim karakteristikama izrađenih za potrebe ove studije.

Tablica 1. Prikaz svih modela i njihovih karakteristika

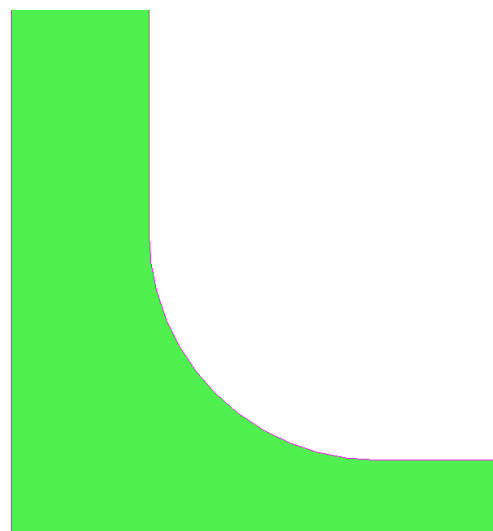
| Broj modela | Debljina stijenke $t$ [mm] | Duljina otvora $l$ [mm] | Visina otvora $a$ [mm] | Omjer $l/a$ | Radijus $r$ [mm] | Omjer $r/a$ |
|-------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|------------------|-------------|
| 1           | 8                          | 2000                    | 2000                   | 1           | 0                | 0           |
| 2           | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 0                | 0           |
| 3           | 16                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 0                | 0           |
| 4           | 8                          | 2000                    | 2000                   | 1           | 200              | 0.1         |
| 5           | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 200              | 0.1         |
| 6           | 16                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 200              | 0.1         |
| 7           | 8                          | 2000                    | 2000                   | 1           | 400              | 0.2         |
| 8           | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 400              | 0.2         |
| 9           | 16                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 400              | 0.2         |
| 10          | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 600              | 0.3         |
| 11          | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 600              | 0.3         |
| 12          | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 600              | 0.3         |
| 13          | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 800              | 0.4         |
| 14          | 12                         | 2000                    | 2000                   | 1           | 1000             | 0.5         |
| 15          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 0                | 0           |
| 16          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 100              | 0.1         |
| 17          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 200              | 0.2         |
| 18          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 300              | 0.3         |
| 19          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 400              | 0.4         |
| 20          | 12                         | 2000                    | 1000                   | 2           | 500              | 0.5         |
| 21          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 0                | 0           |
| 22          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 67               | 0.1         |
| 23          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 133              | 0.2         |
| 24          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 200              | 0.3         |
| 25          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 267              | 0.4         |
| 26          | 12                         | 2000                    | 667                    | 3           | 333              | 0.5         |
| 27          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 0                | 0           |
| 28          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 50               | 0.1         |
| 29          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 100              | 0.2         |
| 30          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 150              | 0.3         |
| 31          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 200              | 0.4         |
| 32          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 250              | 0.5         |
| 33          | 12                         | 2000                    | 500                    | 4           | 250              | 0.5         |



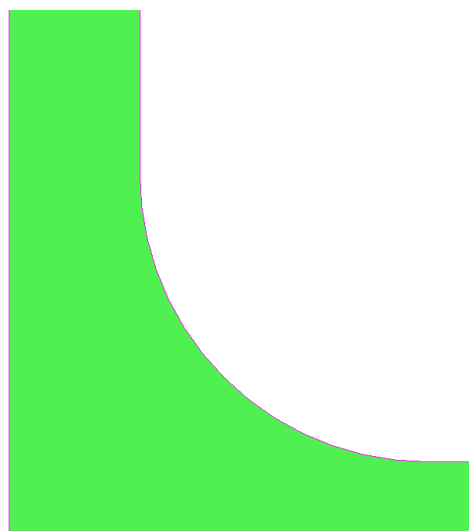
**Slika 7. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja  $r = 200$  mm ( $l/a = 1$ )**



**Slika 8. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja  $r = 400$  mm ( $l/a = 1$ )**



**Slika 9. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja  $r = 600$  mm ( $l/a = 1$ )**



**Slika 10. Detalj kuta otvora s radijusom zaobljenja  $r = 800$  mm ( $l/a = 1$ )**

## 2.2.1 Mreža konačnih elemenata

### 2.2.1.1 Tipovi elemenata

Za izradu mreže konačnih elemenata korišteni su Nastranov CQUAD4, CTRIA3 te CROD konačni elementi.

CQUAD4 konačni element Nastranov je najrašireniji element u modeliranju membrana, ploča i ljusaka. To je izoparametarski, četverokutni (kvadrilateralni) ravninski element koji može opisati slučaj ravninskog stanje naprezanja, savijanje i utjecaj poprečnih smičnih sila. Koristi se za mreže konačnih elemenata na ravnim ili blago zakrivljenim površinama. Element dopušta odstupanja od ortogonalnosti susjednih stranica elementa, ali dozvoljena odstupanja moraju biti što manja da bi rezultati bili pouzdani. Ovaj element nema izravnu krutost za rotacijski stupanj slobode oko normale na površinu elementa (drilling stupanj slobode), nego se taj stupanj slobode sprječava, ili rješavač sam računa minimalnu krutost kako bi se izbjegla singularnost globalne matrice krutosti, [7].

CTRIA3 je izoparametarski trokutni element sa proizvoljnim spajanjem savojne i membranske krutosti. Za potrebe ovog rada korišten je samo u slučaju izrade mreže elemenata kod detalja, gdje zbog složenosti geometrije, upotreba isključivo četverokutnih elemenata nije bila moguća.

CROD konačni element je linijski štapni element koji posjeduje samo aksijalnu i torzijsku krutost, a svojstva su mu konstantna po duljini elementa. Za potrebe ovog rada korišten je za potrebe očitavanja naprezanja sa slobodnog ruba, a iz tog razloga elementu je dodijeljena zanemariva aksijalna krutost (poprečni presjek površine  $1\text{mm}^2$ ).

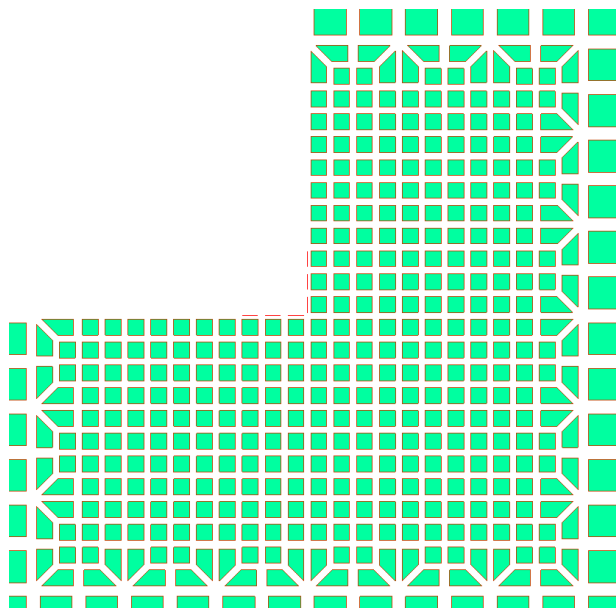
### 2.2.1.2 Veličina mreže

Prema pravilima klasifikacijskog društva Lloyd's Register za direktne proračune strukturnih detalja, mreža konačnih elemenata trebala bi biti u skladu sa slijedećim:

- Kod kuta otvora s radijusom zaobljenja: potrebno je imati minimalno 15 elemenata po luku slobodnog ruba iznosa  $90^\circ$ . Veličina elemenata ne smije biti veća od 150 mm x 150 mm i ne smije biti manja od  $t \times t$ .
- Gdje MKE programski paketi ne pokazuju precizna čvorna naprezanja, potrebno je inkorporirati linijske štapne elemente (eng. *rod*) male površine poprečnog presjeka za očitavanje vršnih naprezanja po slobodnom rubu.

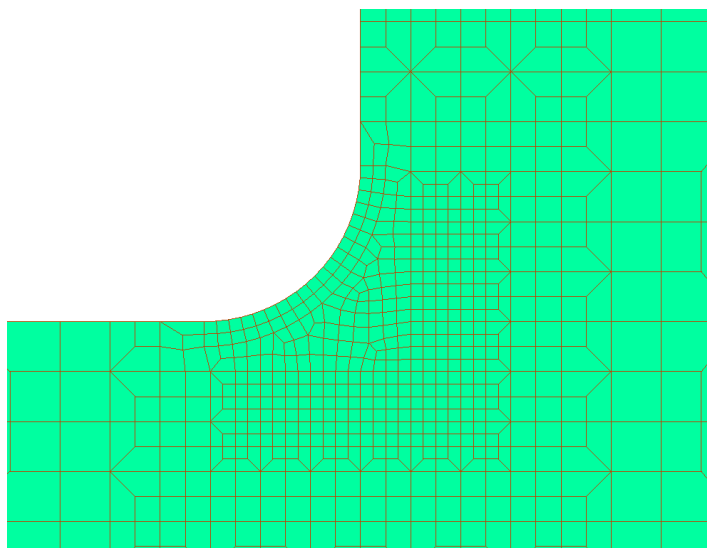
Modeli su izrađeni prema gore navedenim pravilima, odnosno veličina mreže na detalju iznosi  $t \times t$ , a veličina u ostatku modela ne prelazi 100 mm x 100 mm. Zbog jednostavnosti modela odnosno brzine provedbe analize, nije bilo potrebno daljnje pogrubljenje mreže konačnih elemenata.

Slika 11 prikazuje mrežu konačnih elemenata detalja kuta otvora ( $r=0$ ). U svakom smjeru generirano je 10 elemenata veličine  $t \times t$ , a nakon toga mreža se postepeno uvećava. Mogu se primijetiti i linijski štapni elementi po slobodnom rubu (crvena boja). Kao što je već navedeno u ovom poglavlju, isti su generirani samo za očitavanje vršnih naprezanja po slobodnom rubu. Dodijeljena im je mala površina poprečnog presjeka ( $1 \text{ mm}^2$ ) stoga im je aksijalna krutost zanemariva.



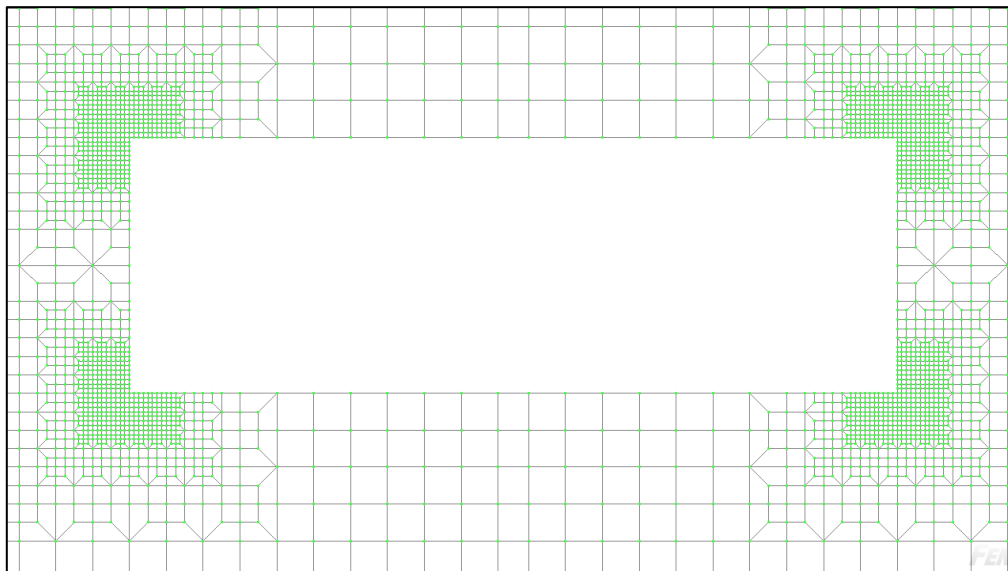
**Slika 11. Prikaz mreže elemenata detalja kuta otvora ( $r = 0$ )**

Slika 12 prikazuje mrežu elemenata na detalju kuta s radijusom zaobljenja  $r = 200$  mm. Veličina mreže uz radijus je  $t \times t$  te se postupno uvećava sa udaljavanjem. Elementi prate zakrivljenost radijusa u 2 reda te se nakon toga prilagođavaju ostatku mreže. Također, prisutni su i štapni elementi za očitavanje vršnih naprezanja po slobodnom rubu, no zbog njihove zanemarive površine poprečnog presjeka, nisu vidljivi na slici.



**Slika 12. Prikaz mreže elemenata detalja kuta otvora s radijusom zaobljenja ( $r = 200$  mm)**

Slika 13 prikazuje mrežu elemenata na jednom otvoru gdje se može primijetiti postepeno povećanje veličine mreže prema maksimalnoj veličini elementa koja je za potrebe ove studije iznosila 100 mm x 100 mm.



Slika 13. Prikaz mreže elemenata na jednom otvoru (model  $l/a = 3, r = 0$ )

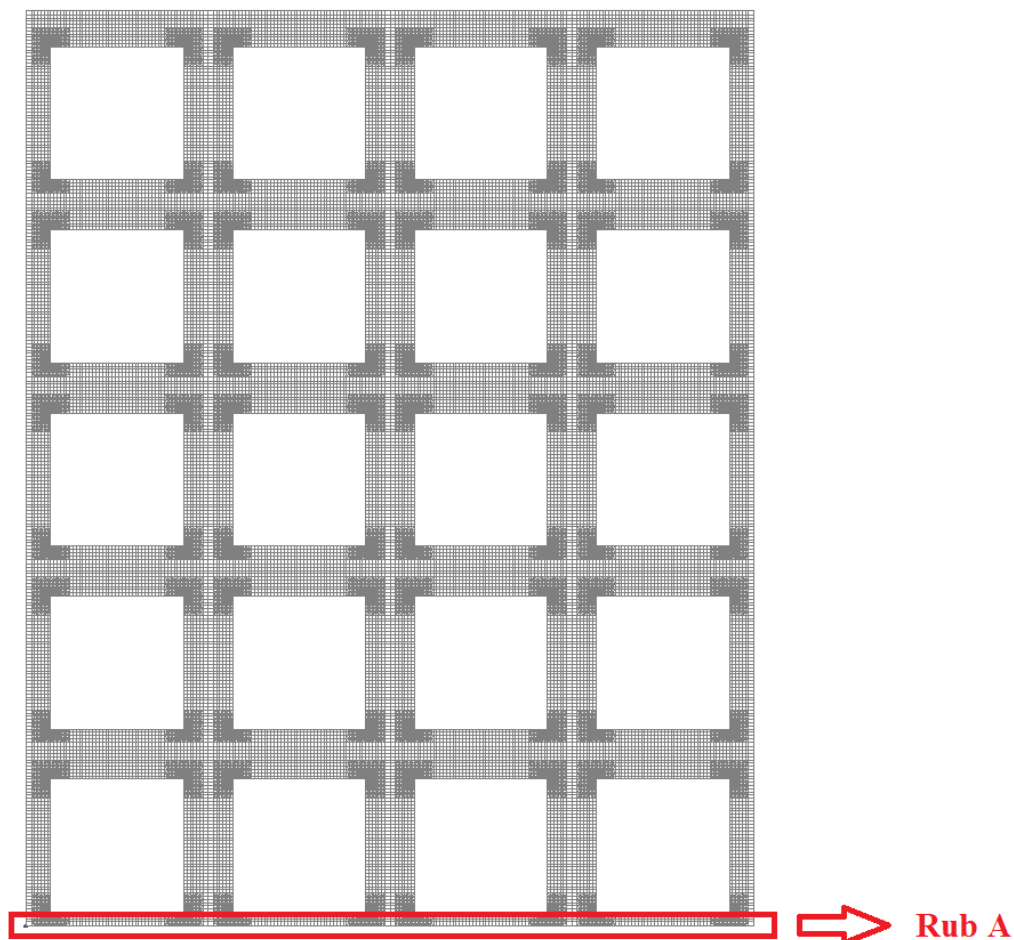
### 2.2.2 Rubni uvjeti

Rubni uvjeti za modele korištene u studiji vrlo su jednostavni. Svi čvorovi uz donji rub modela imaju spriječenih svih 6 stupnjeva slobode, odnosno model je upet za rub A (Slika 14)

Tablica 2 prikazuje rubne uvjete za sve modele.

Tablica 2. Opis čvornih ograničenja pomaka za sve modele

| Pozicija čvora<br>(Slika 14) | Stupnjevi slobode |    |    |    |    |    |
|------------------------------|-------------------|----|----|----|----|----|
|                              | Tx                | Ty | Tz | Rx | Ry | Rz |
| Rub A                        | 0                 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 0                            | Spriječeno        |    |    |    |    |    |
| 1                            | Dozvoljeno        |    |    |    |    |    |



Slika 14. Prikaz čvornih ograničenja pomaka (rub A)

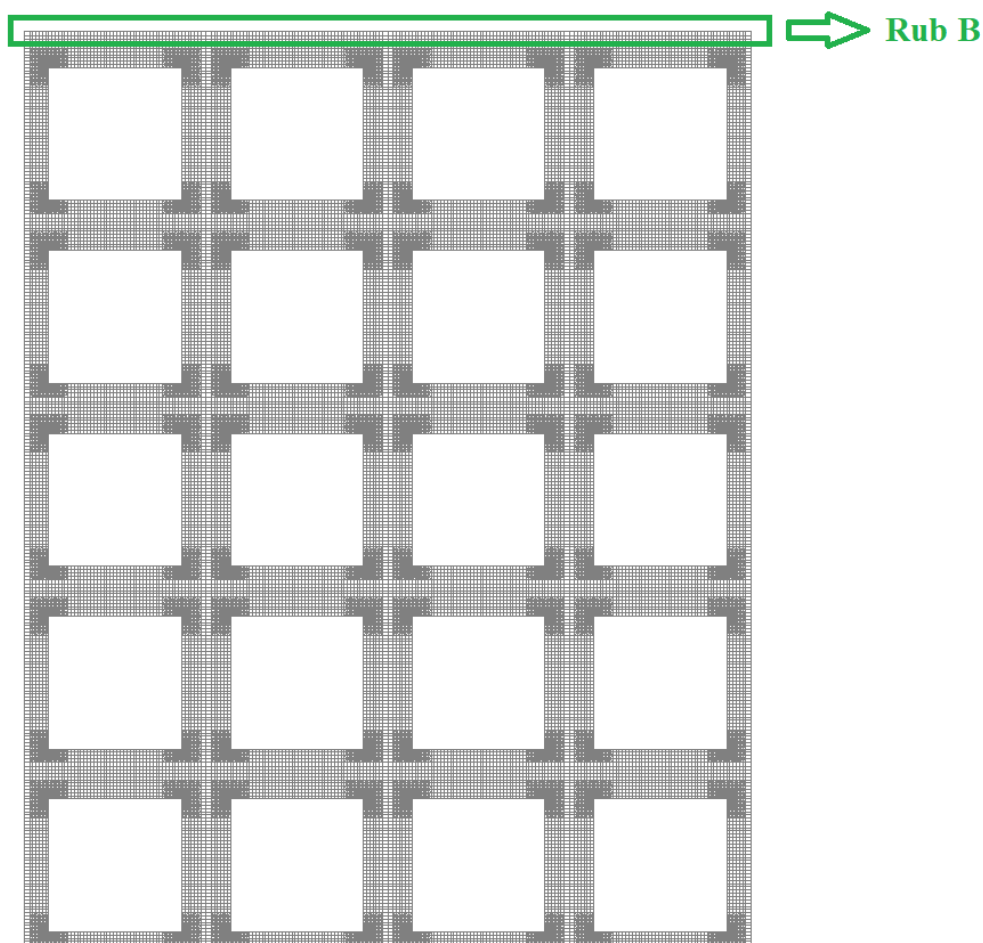
### 2.2.3 Slučaj opterećenja

Kako bi se simuliralo smično-savojno opterećenje, opterećenje je postavljeno po najvišim čvorovima modela, te je svakom čvoru pridodana zasebna vrijednost opterećenja (sila) u smjeru  $x$ -osi (Slika 15). Sila je vrijednosti  $F = 10000$  N, a ona je okvirno određena da razine naprezanja budu realnog reda veličine zbog lakše obrade podataka (Tablica 3).

Tablica 3. Opis čvornih opterećenja za sve modele

| Pozicija čvora<br>(Slika 15) | Iznos sile [N] |   |   |
|------------------------------|----------------|---|---|
|                              | X              | Y | Z |
| Rub B                        | 10000          | 0 | 0 |

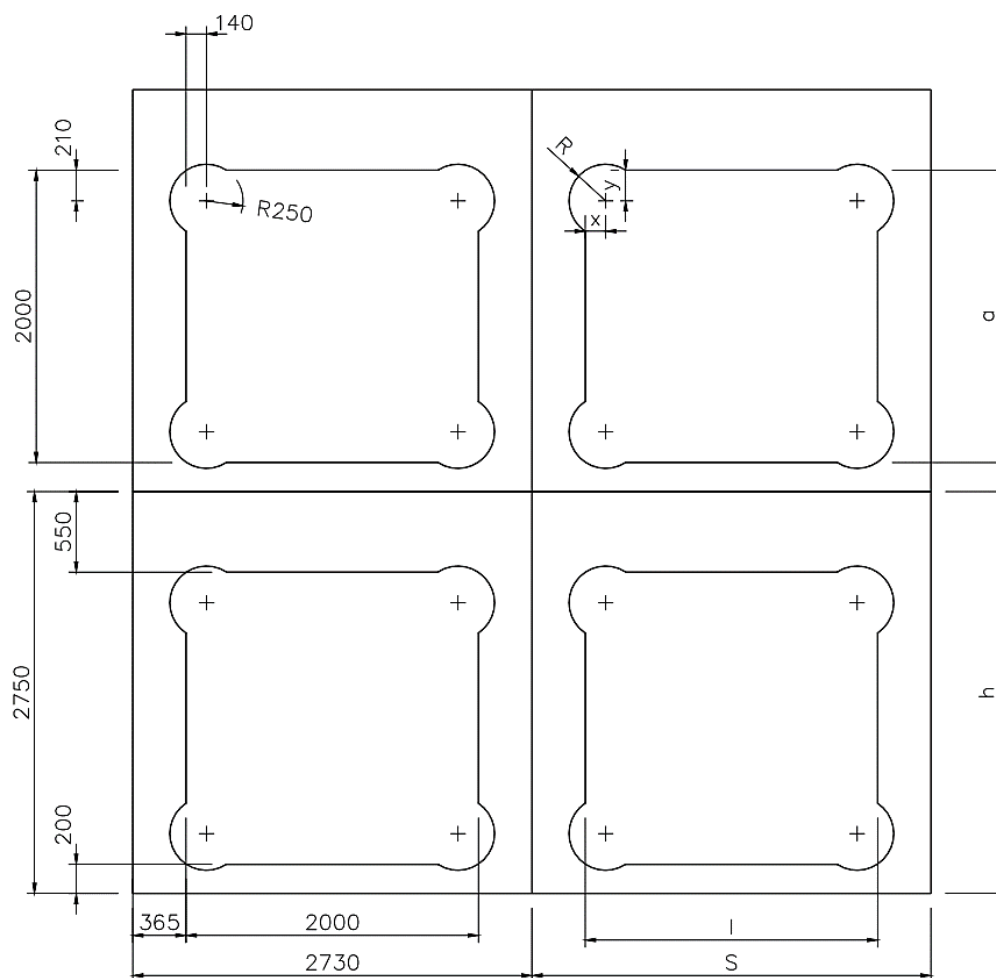




Slika 15. Prikaz čvorova opterećenih silom  $F=10000$  N (rub B)

### 2.3 Geometrija kuta otvora „mišje uši“

Kod brodova za kružna putovanja, posljednji trend je da svaka soba za putnike ima balkon. Također je poželjno da balkonska vrata budu što je moguće veća. Radijusi u kutovima otvora bitno smanjuju maksimalnu moguću veličinu balkonskih vrata te se iz tog razloga pojavila nova geometrija kuta otvora nazvana „mišje uši“ (Slika 16). Na ovaj način, maksimalna moguća veličina balkonskih vrata jednaka je veličini otvora. U sklopu ovog rada, istražena je redukcija naprezanja koju daje ova geometrija u odnosu na otvor bez radijusa. Također, varirani su radijusi kako bi se istražio njihov utjecaj na redukciju naprezanja.



**Slika 16. Prikaz otvora geometrije – „mišje uši“ ( $l/a = 1$ ,  $r = 250$  mm)**

Ova geometrija kuta otvora testirala se na modelu sa omjerom duljine i visine otvora  $l/a=1$  ( $t=12$  mm) jer je taj omjer tipičan za balkonske otvore na brodu za kružna putovanja. Duljine  $x$  i  $y$  su udaljenosti središta radijusa od rubova otvora (Slika 16). One su držane u jednakom omjeru s radijusom tako da temeljna svojstva geometrije, izuzev iznosa radijusa, nisu mijenjana.

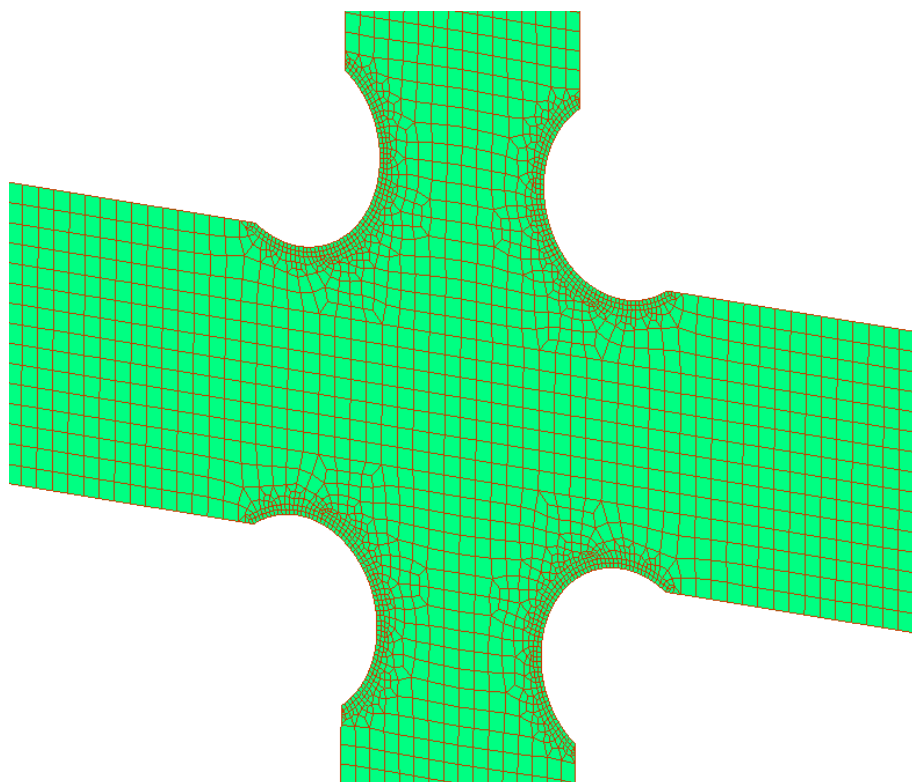
Tablica 4 prikazuje popis modela sa njihovim karakteristikama.

Tablica 4. Karakteristike modela geometrije kuta otvora – „mišje uši“

| Broj modela | Omjer $l/a$ | Radijus $r$ [mm] | Omjer $r/a$ | $x$ [mm] | $y$ [mm] |
|-------------|-------------|------------------|-------------|----------|----------|
| 1           | 1           | 150              | 0.075       | 84       | 126      |
| 2           | 1           | 200              | 0.1         | 112      | 168      |
| 3           | 1           | 250              | 0.125       | 140      | 210      |
| 4           | 1           | 300              | 0.15        | 168      | 252      |

Modeli su diskretizirani na isti način kao i prethodni modeli. Veličina mreže uz slobodni rub detalja kuta otvora iznosi  $t \times t$  te se postepeno uvećava sa udaljavanjem od ruba (Slika 17). Također, korišteni su štapni elementi za očitavanje vršnih naprezanja uz slobodni rub.

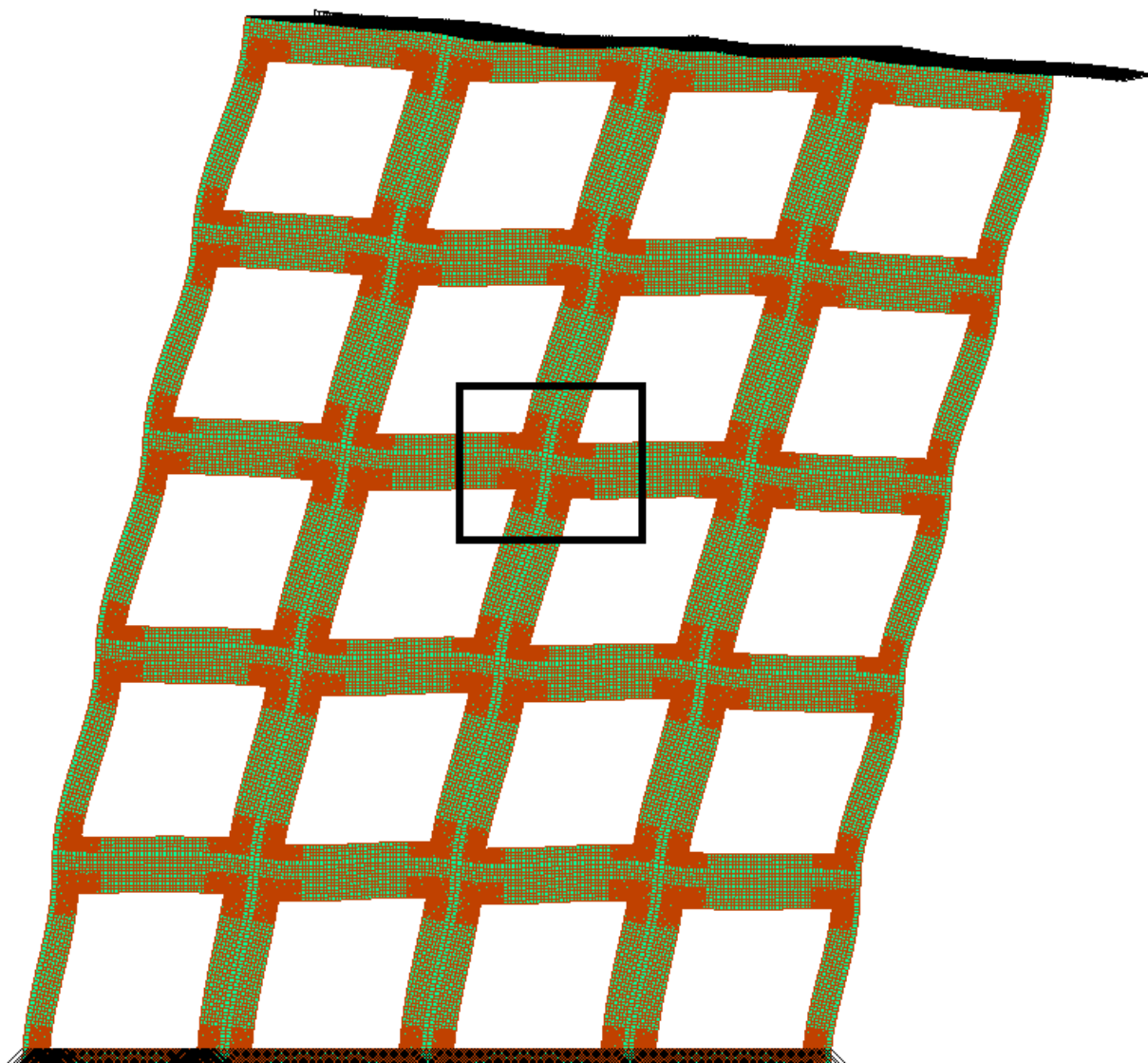
Rubni uvjeti i opterećenja su jednaki kao i za prethodne modele, a opisani su u poglavlju 2.2.2 odnosno 2.2.3.

Slika 17. Diskretizirani model geometrije kuta otvora „mišje uši“ ( $r = 250$  mm)

### 3 REZULTATI

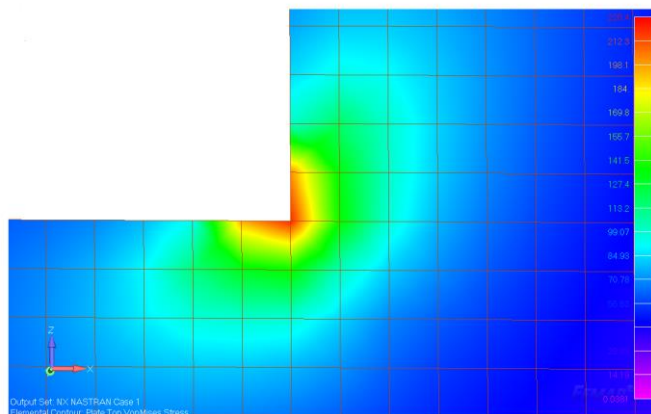
#### 3.1 Obrada rezultata

Za početak, na polaznom modelu uspoređena su naprezanja po cijeloj visini i širini modela, odnosno u svakom otvoru. Naprezanja su simetrična po širini modela dok su po visini ustaljena, izuzev prvog reda gdje je veliki utjecaj rubnih uvjeta. Iz navedenog razloga, za daljnju provedbu studije razmatralo se označeno područje (Slika 18).

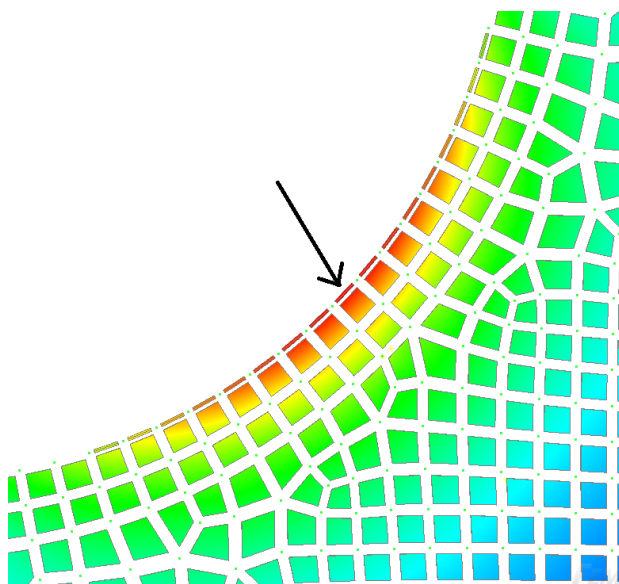


Slika 18. Deformirani model ( $l/a = 1, r = 0$ )

Slika 19 prikazuje ekvivalentna (Von Mises) naprezanja na detalju kuta otvora bez radijusa. Može se primijetiti da je koncentracija naprezanja smještena uz sam rub nekoliko elemenata. Obzirom da programski paket Femap daje podatke o naprezanjima u čvorovima elementa ili u njegovom težištu, dodani su štapni elementi zanemarive aksijalne krutosti. Slika 20 prikazuje primjer očitavanja naprezanja sa štapnih elemenata.



**Slika 19. Prikaz ekvivalentnih (Von Mises) naprezanja u detalju kuta otvora ( $r = 0$ )**



**Slika 20. Prikaz očitavanja aksijalnih naprezanja sa štapnih elemenata**

### 3.2 Koeficijent redukcije naprezanja

Rezultati su prikazani u bezdimenzionalnom obliku uvođenjem koeficijenta redukcije naprezanja. Koeficijent redukcije naprezanja je omjer naprezanja geometrijski poboljšanog kuta otvora (sa određenim radijusom) i kuta otvora bez radijusa (pravi kut), Izraz (1).

$$K_{RN} = \frac{\sigma_{(r/a>0)}}{\sigma_{(r/a=0)}} \quad (1)$$

### 3.3 Parametar debljine stijenke

Tijekom planiranja studije, pojavilo se pitanje da li parametar debljine stijenke utječe na rezultate studije. Iz navedenog razloga, za početak generirani su modeli omjera duljine i visine  $l/a = 1$ , a varirani su različiti omjeri radijusa i visine. Svi navedeni modeli su također varirani sa različitim debljinama stijenke (8, 12 i 16 mm). Rezultati pokazuju da parametar debljine ne utječe na rezultate studije te su daljnji modeli generirani samo s jednom debljinom stijenke (Tablica 5).

**Tablica 5. Koeficijent redukcije naprezanja ovisno o debljini stijenke**

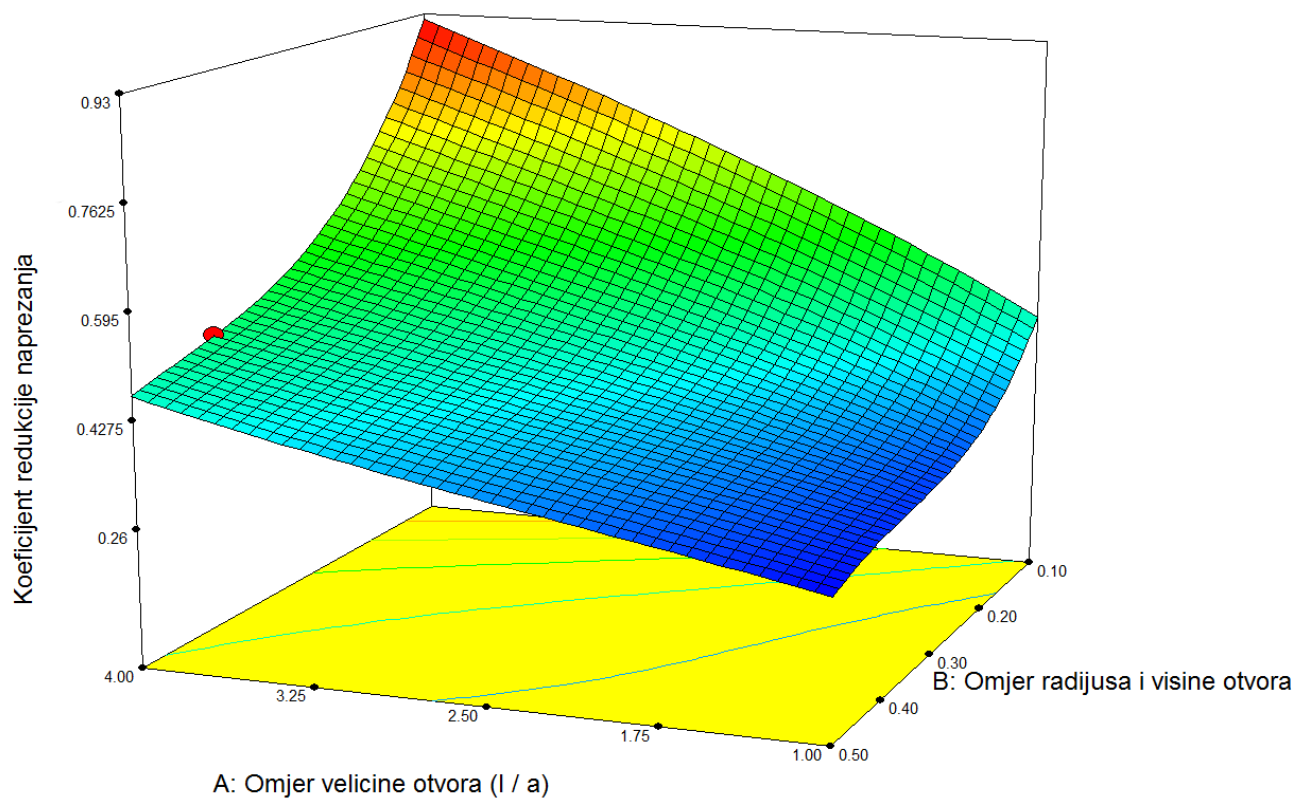
|       |          | $K_{RN}$ |         |         |
|-------|----------|----------|---------|---------|
|       |          | $r/a$    |         |         |
| $l/a$ | $t$ [mm] | 0.1      | 0.2     | 0.3     |
| 1     | 8        | 0.33565  | 0.39222 | 0.47211 |
|       | 12       | 0.33564  | 0.39223 | 0.47206 |
|       | 16       | 0.33565  | 0.39202 | 0.46821 |

### 3.4 Prikaz rezultata

Tablica 6 prikazuje konačne rezultate studije. Koeficijenti redukcije naprezanja dani su za različite omjere  $l/a$  i  $r/a$ . U programu Design Expert [8] konstruiran je plošni dijagram (Slika 21) te je prikazana jednadžba plohe (Izraz 2.) za računanje redukcija naprezanja za vrijednosti koje nisu obuhvaćene u tablici.

Tablica 6. Koeficijent redukcije naprezanja za sve modele

|       | $K_{RN}$ |       |       |       |       |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
|       | $r/a$    |       |       |       |       |
| $l/a$ | 0.1      | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   |
| 1     | 0.464    | 0.359 | 0.316 | 0.287 | 0.264 |
| 2     | 0.643    | 0.484 | 0.411 | 0.365 | 0.332 |
| 3     | 0.794    | 0.587 | 0.495 | 0.439 | 0.392 |
| 4     | 0.922    | 0.687 | 0.580 | 0.513 | 0.467 |



Slika 21. Prikaz plohe redukcije naprezanja

Izraz (2) predstavlja jednadžbu plohe koja za bilo koji iznos parametara A i B u dozvoljenim intervalima daje iznos redukcije naprezanja.

$$K = 0,41 + 0,31 \cdot A - 2,28 \cdot B - 0,72 \cdot A \cdot B - 0,030 \cdot A^2 + 7,19 \cdot B^2 + 0,034 \cdot A^2 \cdot B + 0,57 \cdot A \cdot B^2 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot A^3 + 7,13 \cdot B^3 \quad (2)$$

K – koeficijent redukcije naprezanja

A – omjer veličine otvora ( $l/a$ )

B – omjer radijusa i visine otvora ( $r/a$ )

Tablica 6 ukazuje da je redukcija naprezanja veća što je radijus veći te je takav rezultat bio očekivan. Sa porastom omjera veličine otvora ( $l/a$ ), redukcija naprezanja opada. Može se zaključiti da veći utjecaj na redukciju koncentracije naprezanja ima omjer radijusa zaobljenja kuta otvora i visine otvora ( $r/a$ ) nego omjer veličine otvora ( $l/a$ ), Slika 21.

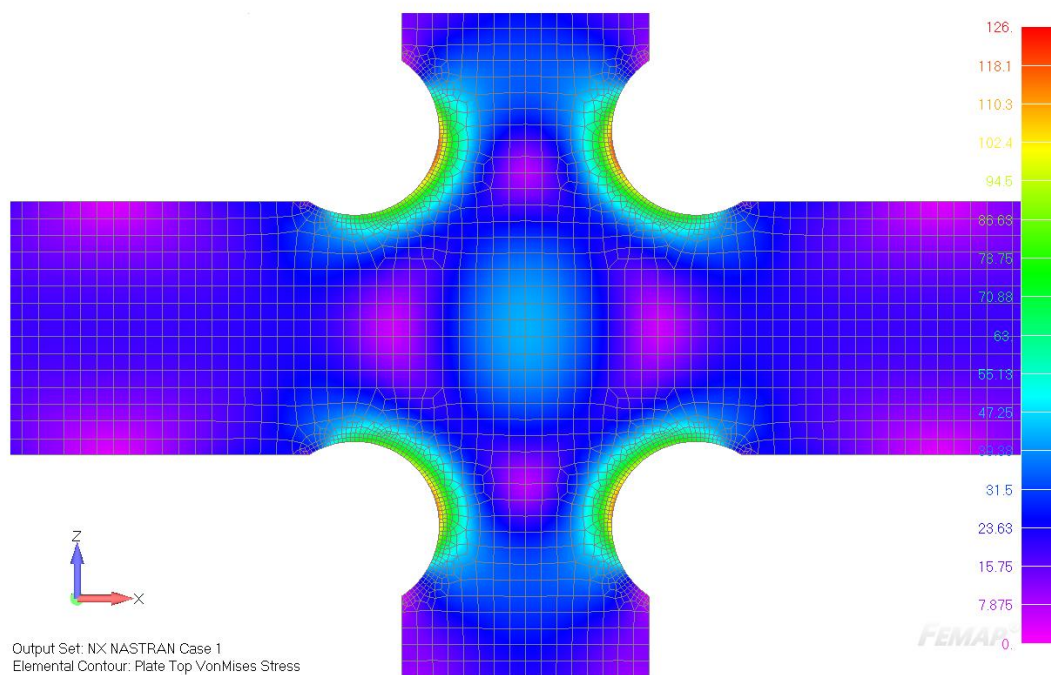
### 3.5 Rezultati kuta otvora geometrije - „mišje uši“

Iz dobivenih rezultata (Tablica 7) može se primijetiti da sa povećanjem radijusa ne dolazi do znatnijeg smanjenja koncentracije naprezanja. Prosječni koeficijent redukcije naprezanja za sve modele iznosi oko 0,55. Možemo zaključiti da „mišje uši“ nisu toliko efikasne u smanjenju koncentracija naprezanja u odnosu na klasični kut otvora poboljšan radijusom određenog iznosa (Slika 7 - Slika 10). Međutim, idealne su za primjenu na balkonskim otvorima na brodovima za kružna putovanja. Redukcija naprezanja je znatna u odnosu na kut otvora bez radijusa (pravi kut), a ne utječu na maksimalnu ugradivu veličinu balkonskih vrata. Iz navedenog razloga, ovaj oblik geometrije kuta otvora neće biti testiran na globalnom 3D MKE modelu cijelog broda za prijevoz žive stoke (Poglavlje 4.).

**Tablica 7. Rezultati otvora geometrije – „mišje uši“**

| $l$  | $a$  | $l/a$ | $r$ | $r/a$ | $\sigma$ | $K_{RN}$ |
|------|------|-------|-----|-------|----------|----------|
| 2000 | 2000 | 1     | 0   | 0     | 229      | 1        |
|      |      |       | 150 | 0.075 | 138      | 0.600    |
|      |      |       | 200 | 0.1   | 128      | 0.556    |
|      |      |       | 250 | 0.125 | 122      | 0.533    |
|      |      |       | 300 | 0.15  | 120      | 0.525    |
| 1500 | 2000 | 0.75  | 0   | 0     | 152      | 1        |
|      |      |       | 250 | 0.125 | 81       | 0.530    |



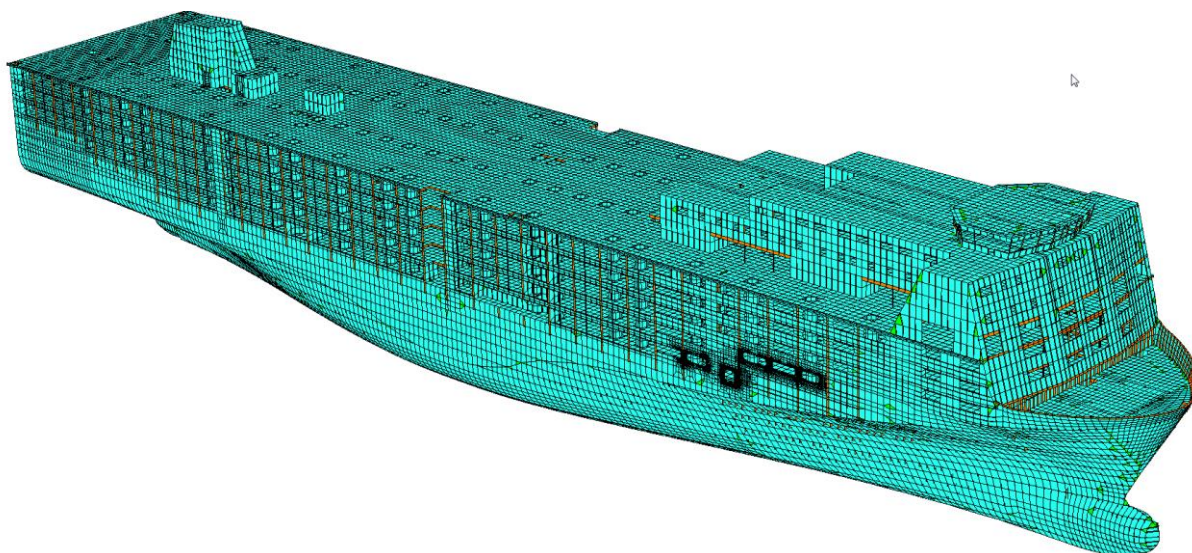


**Slika 22. Prikaz ekvivalentnih naprežanja na geometriji kuta otvora „mišje uši“**

## 4 TESTIRANJE NA PRIMJERU VIŠEPALUBNOG BRODA ZA PRIJEVOZ ŽIVE STOKE

### 4.1 Višepalubni brod za prijevoz žive stoke

Brodovi za prijevoz žive stoke (eng. *livestock carrier*) pripadaju specifičnim tipovima visoko specijaliziranih brodova koji iako se grade u malim serijama značajan su proizvod hrvatske brodograđevne industrije. Takvi tipovi brodova projektiraju se s izrazito velikim nadgrađima i mnogobrojnim palubama koje se protežu duž cijelog broda. Kako se radi o vrlo velikim i složenim brodskim konstrukcijama koje karakterizira kompleksna strukturna interakcija nadgrađa i donjeg trupa broda potrebno je detaljno razmotriti primarnu čvrstoću broskog trupa kao temelj racionalnog projekta brodske konstrukcije. [9]



Slika 23. Detaljni MKE model cijelog broda

Uzduž vanjske oplata nadgrađa broda prostiru se veliki otvori koji predstavljaju slabu točku u strukturi broda oko kojih se generiraju visoke koncentracije naprezanja. Stoga je vrlo bitno odabrati prikladnu geometriju otvora s ciljem smanjenja koncentracije naprezanja.

## 4.2 Tehnički opis broda (novogradnja 526 – ULJANIK)

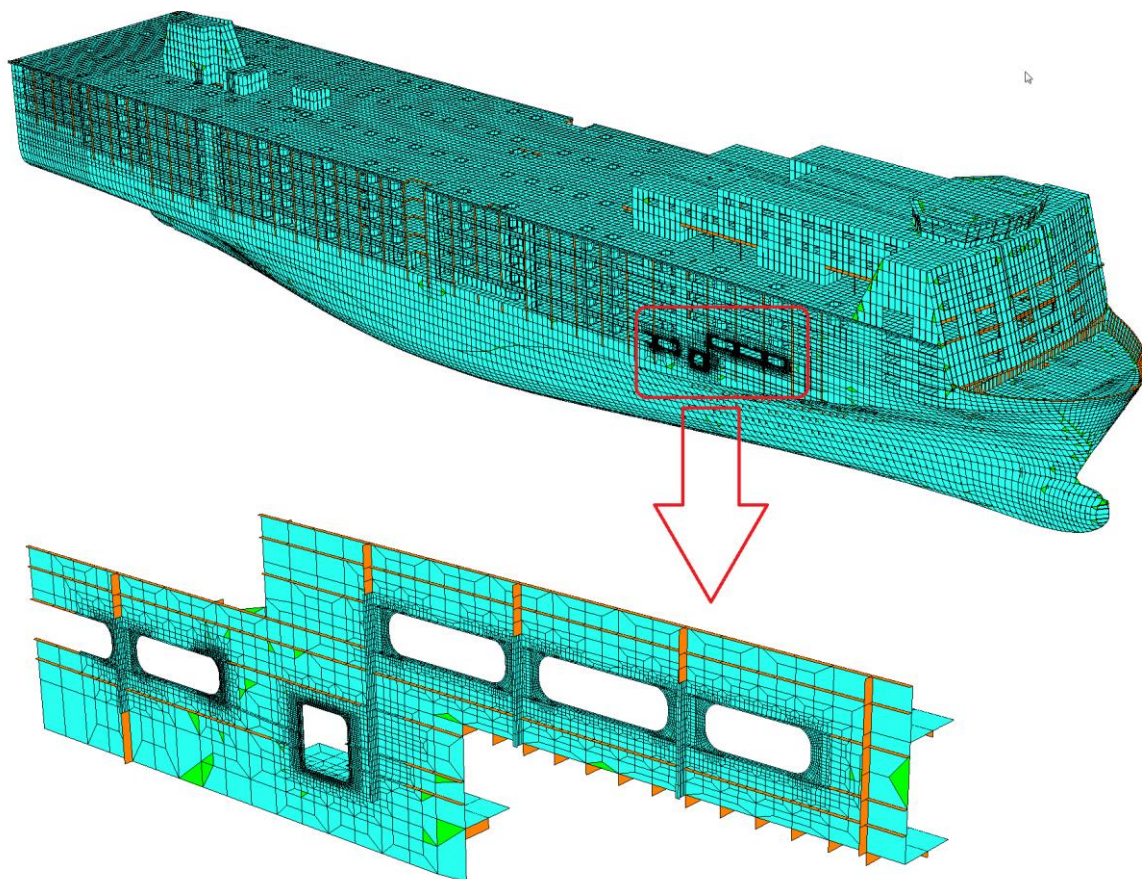
Tablica 8 prikazuje glavne karakteristike zadanog broda za prijevoz žive stoke.

**Tablica 8. Tehnički opis broda (novogradnja 526)**

| Dimenzije                                      |       |                                     |
|--|-------|-------------------------------------|
| Duljina preko svega                            | $L$   | 181,1 m                             |
| Duljina između krmene i pramčane okomice       | $L$   | 169,25 m                            |
| Širina   | $B$   | 31,1 m                              |
| Visina   | $H$   | 26,75 m                             |
| Gaz  | $T$   | 8,7 m                               |
| Koeficijent istisnine                          | $C_b$ | 0,549                               |
| Razmak okvira                                  | $s$   | 4250 mm                             |
| Razmak rebrenica                               | $s_r$ | 2125 mm                             |
| Maksimalna trajna snaga pogonskog stroja (MCR) | $P$   | 12 460 kw/117 rpm                   |
| Brzina (pokusna plovidba)                      | $V$   | 19,8 čv                             |
| Klasa  | -     | LR 100A1 + LMC UMS<br>NAB, IWS BWMP |

## 4.3 Globalni 3D MKE model

Sukladno rezultatima studije, testirano je nekoliko varijanti kuta otvora na primjeru višepalubnog broda za prijevoz žive stoke projektiranom u brodogradilištu ULJANIK (novogradnja 526), Slika 23. Globalni 3D MKE model navedenog broda dostupan je na Fakultetu. Odabran je detalj otvora na vanjskoj oplati nadgrađa broda te su uspoređivani odzivi na kutu otvora bez radijusa zaobljenja i kutova otvora s radijusom zaobljenja (Slika 24).

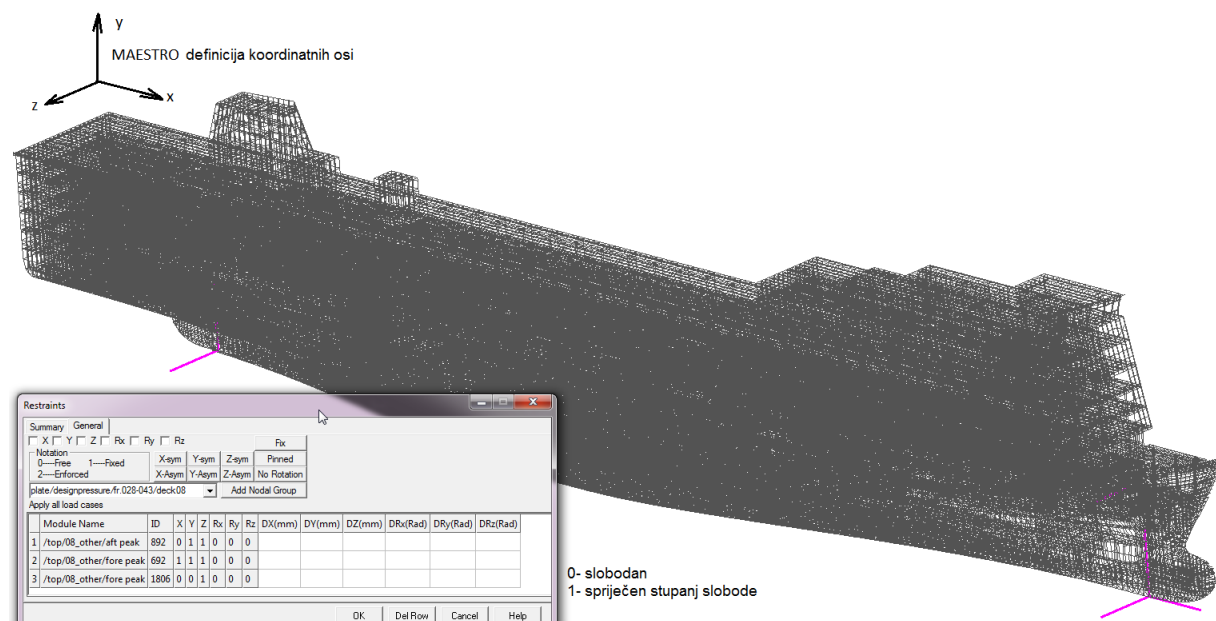


**Slika 24. Prikaz detalja vanjske oplata nadgrađa sa otvorima**

Globalni model izrađen je u programskom paketu Maestro [10]. Detalj vanjske oplata nadgrađa izvezen je u programski paket Femap putem Nastran datoteke gdje je bio uređivan. Ukupno su testirane 4 varijante sa radijusima iznosa 0, 300, 400 i 500 mm. Geometrija otvora odnosno omjer duljine i visine  $l/a$  iznosi 4. Nakon uređivanja, modeli su uvezeni natrag u programski paket Maestro na isti način, odnosno putem Nastran datoteke.

#### **4.3.1 Rubni uvjeti**

Kod zadavanja MKE modela cijelog broda spriječen je samo minimalni broj stupnjeva slobode modela koji onemogućavaju pomak modela kao krutog tijela. Rubnim uvjetima su propisane spriječenost translacijskih i rotacijskih pomaka u određenom čvoru. Prva tri broja označavaju translacijske pomake u smjeru osi X, Y i Z, a zadnje tri broja označavaju rotacijske pomake oko istih osi (Slika 25). Za razmatrani slučaj propisani su rubni uvjeti prema Pravilima Lloyd Registra za direktni proračun RoRo brodova.



Slika 25. Rubni uvjeti za globalni model cijelog broda

#### 4.3.2 Slučajevi opterećenja

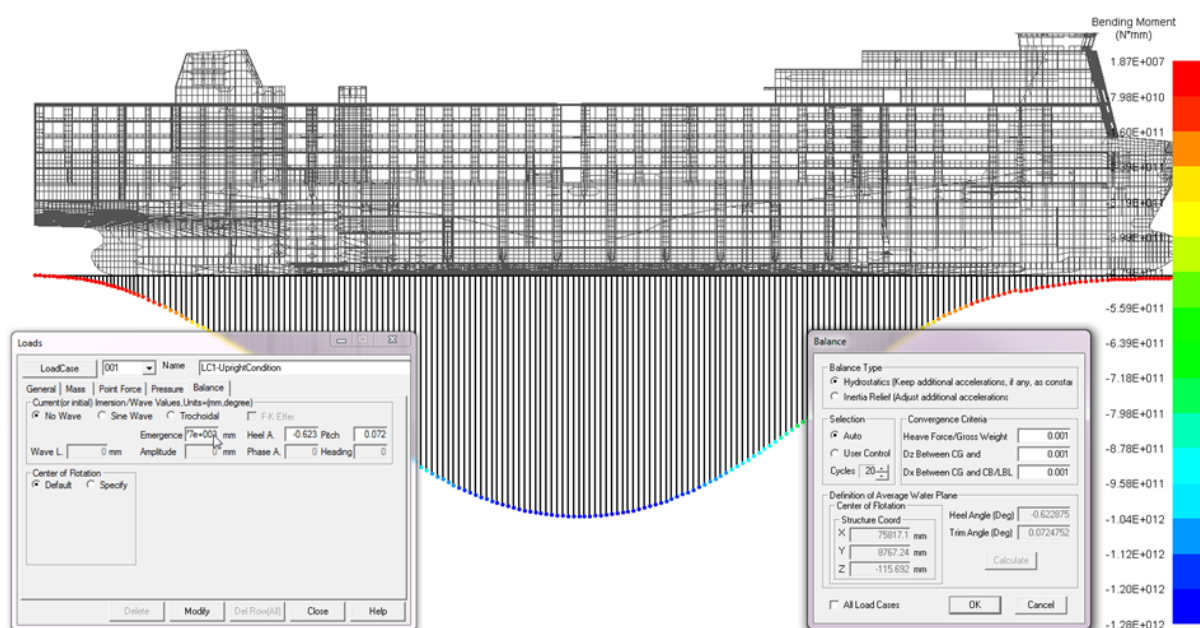
Ovakav tip broda ima finu formu sa blok koeficijentom  $C_B=0,549$  te ima relativno kontinuiran raspored vlastite težine i tereta. S obzirom da se forma broda sužava prema pramcu i krmi, ovaj brod je na mirnoj vodi u stanju pregiba, što znači da ima višak težine na krajevima a višak uzgona na sredini. Uslijed takve distribucije statičkog opterećenja, dobiveni statički momenti pregiba su vrlo veliki. Zbog toga nam se najveća moguća uzdužna naprezanja javljaju u kombinaciji maksimalnog statičnog pregibnog momenta savijanja i maksimalnog valnog pregibnog savijanja. Kada nam se brod nađe u situaciji da je na maksimalnom progibnom valnom momentu i minimalnom statičkim pregibnim momentom, postoji vjerojatnost da brod dođe u stanje progiba. To se svakako pokušava izbjeći jer se tada javljaju tlačna naprezanja u palubama nadgrađa, što zbog tankih limova može prouzrokovati izvijanje palube. Upravo zbog navedenih razloga se teži da se brod ne nađe u stanje progiba, te se na taj način i projektira. Kroz ovo studiju razmatrana su četiri slučajeve opterećenja:

- LC1: kompletno stanje krcanja za maksimalno opterećenje na punom gazu i brod na mirnoj vodi (statički slučaj)
- LC2: maksimalni valni moment u pregibu (HOGG)



- LC3: kompletno stanje krcanja za balastno stanje na minimalnom gazu i brod na mirnoj vodi (statički slučaj)
- LC4: maksimalni valni moment u progibu (SAGG)

Slika 26 prikazuje distribuciju vertikalnog momenta savijanja za slučaj opterećenja LC1 po duljini broda. Kod prikaza vrijednosti ostvarenog momenta savijanja u programu MAESTRO konvencija je takva da su s pozitivnim predznakom dani za progibni moment (SAGG), a negativni za pregibni moment (HOGG).



Slika 26. Distribucija vertikalnog momenta savijanja za LC1

### 4.3.3 Rezultati

Za početak su očitavana ekvivalentna (Von Mises) naprezanja u sva 4 kuta otvara za sva 4 slučaja opterećenja (Slika 27). Analizom rezultata došlo se do zaključka da su iznosi naprezanja u sva 4 kuta za pojedini slučaj opterećenja vrlo slični, kao i odnosi između pojedinih slučajeva opterećenja (Tablica 9). Iz navedenog razloga, za daljnju analizu odabran je jedan kut (Slika 28 - Slika 31) gdje su rezultati očitavani pomoću štapnih elemenata.

**Tablica 9. Iznosi Von Mises naprezanja u sva 4 kuta otvara**

|            |       | Iznos naprezanja, $\sigma_{VM}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |      |      |      |
|------------|-------|--|------|------|------|
| kut 1      | $r/a$ | LC1  | LC2  | LC3  | LC4  |
| $r=300$ mm | 0.3   | 252  | 206  | 179  | -353 |
| $r=400$ mm | 0.4   | 219  | 180  | 157  | -310 |
| $r=500$ mm | 0.5   | 212  | 173  | 151  | -297 |
| kut 2      |       |  |      |      |      |
| $r=300$ mm | 0.3   | -227   | -173 | -158 | 297  |
| $r=400$ mm | 0.4   | -200   | -152 | -140 | 261  |
| $r=500$ mm | 0.5   | -195   | -149 | -138 | 255  |
| kut 3      |       |  |      |      |      |
| $r=300$ mm | 0.3   | 228  | 207  | 177  | -355 |
| $r=400$ mm | 0.4   | 197  | 177  | 152  | -304 |
| $r=500$ mm | 0.5   | 195  | 176  | 151  | -302 |
| kut 4      |       |  |      |      |      |
| $r=300$ mm | 0.3   | -249   | -209 | -189 | 358  |
| $r=400$ mm | 0.4   | -217   | -181 | -164 | 311  |
| $r=500$ mm | 0.5   | -208   | -175 | -158 | 299  |

Tablica 10 prikazuje rezultate aksijalnih naprezanja u kutu 1 na detalju otvora vanjske oplata nadgrađa zadanog broda. (Slika 28 -Slika 31).

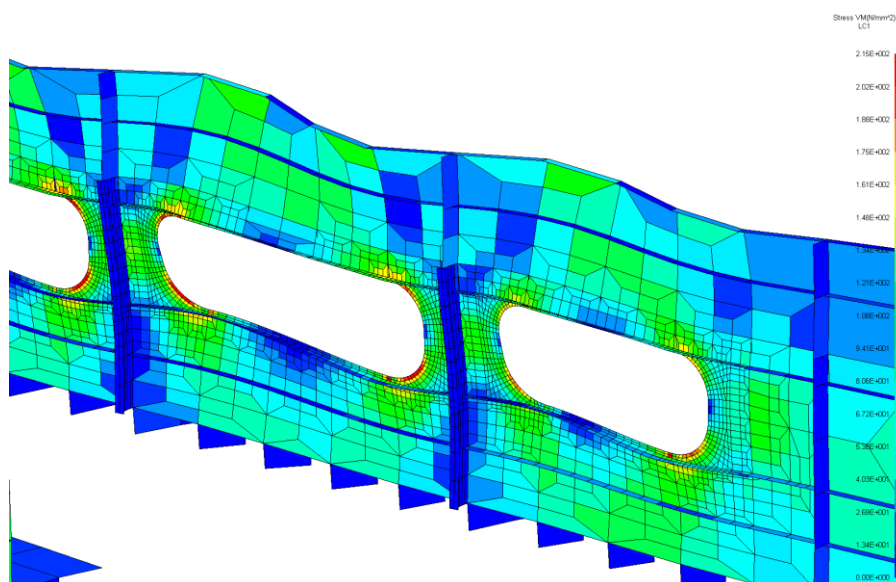
Tablica 10. Iznosi naprezanja u kutu 1 (globalni 3D model broda)

|          |       | $\sigma_x$ |     |     |      |
|----------|-------|------------|-----|-----|------|
| $r$ [mm] | $r/a$ | LC1        | LC2 | LC3 | LC4  |
| 0        | 0     | 498        | 430 | 369 | -738 |
| 300      | 0.3   | 282        | 229 | 199 | -392 |
| 400      | 0.4   | 249        | 204 | 177 | -349 |
| 500      | 0.5   | 230        | 187 | 163 | -320 |

Tablica 11 prikazuje redukciju naprezanja u odnosu na kut otvora sa geometrijom kuta otvora bez radijusa (pravi kut).

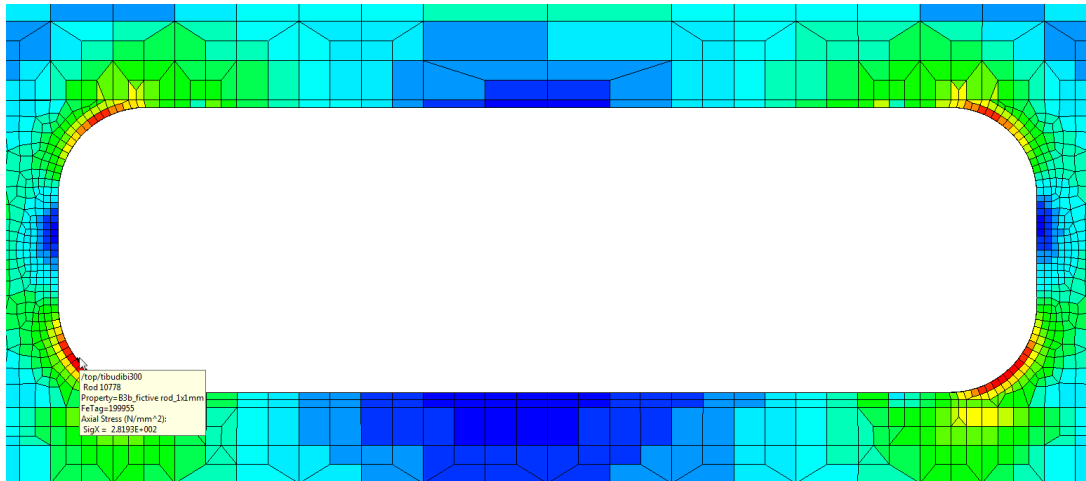
Tablica 11. Prikaz rezultata –  $K_{RN}$  (globalni 3D model)

|          |       | $K_{RN}$ |       |       |       |
|----------|-------|----------|-------|-------|-------|
| $r$ [mm] | $r/a$ | LC1      | LC2   | LC3   | LC4   |
| 0        | 0     | 1        | 1     | 1     | 1     |
| 300      | 0.3   | 0.566    | 0.531 | 0.538 | 0.531 |
| 400      | 0.4   | 0.499    | 0.473 | 0.480 | 0.473 |
| 500      | 0.5   | 0.461    | 0.434 | 0.440 | 0.434 |

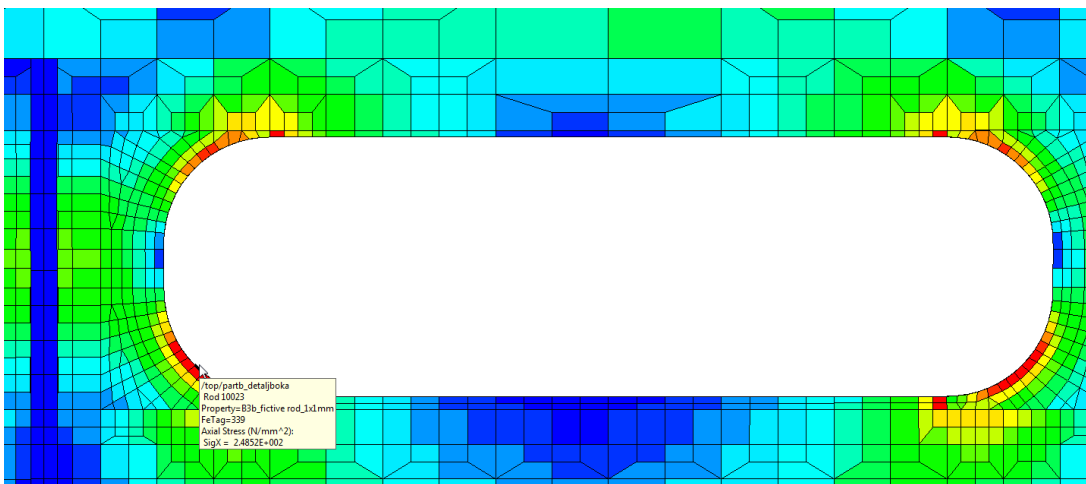


Slika 27. Deformirani model detalja otvora vanjske oplata nadgrađa

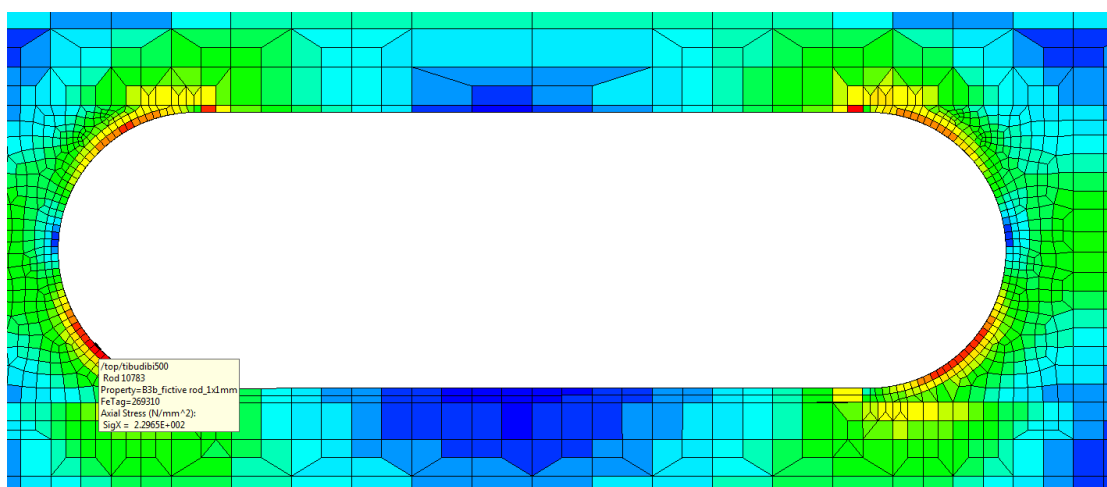




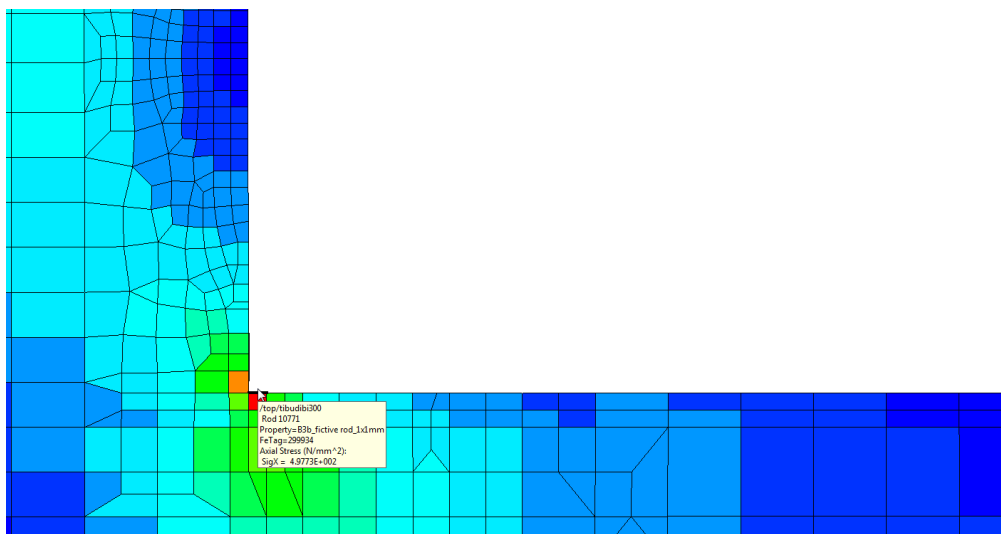
Slika 28. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 300$  mm)



Slika 29. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 400$  mm)



Slika 30. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 500$  mm)

Slika 31. Očitavanje aksijalnog naprezanja sa štapnog elementa ( $r = 0$  mm)

#### 4.4 Usporedba rezultata

Usporedbom rezultata studije i testiranja na globalnom 3D MKE modelu broda sa realnim slučajevima opterećenja, može se primijetiti da studija daje prilično dobre procjene koeficijenta redukcije naprezanja (Tablica 12). Pogreška u procjeni redukcije naprezanja za različite slučajeve opterećenja kreće se od 1 - 8 %.

Tablica 12. Usporedba rezultata

|                                  |                    | $K_{RN}$ |       |       |
|----------------------------------|--------------------|----------|-------|-------|
|                                  |                    | $r/a$    |       |       |
|                                  | Slučaj opterećenja | 0.3      | 0.4   | 0.5   |
| Globalni MKE model cijelog broda | LC1                | 0.566    | 0.499 | 0.461 |
|                                  | LC2                | 0.531    | 0.473 | 0.434 |
|                                  | LC3                | 0.538    | 0.480 | 0.440 |
|                                  | LC4                | 0.531    | 0.473 | 0.434 |
| Parcijalni 2D model otvora       | -                  | 0.580    | 0.513 | 0.467 |

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je parametarska studija kojom se istražila geometrija oko kutova otvora na vanjskoj oplati višepalubnih brodova. Generirano je preko 40 parcijalnih 2D modela otvora kako bi se istražila promjena koncentracije naprezanja sa promjenom geometrije kuta otvora ( $r/a$ ) i omjerom veličine otvora ( $l/a$ ). Uveden je koeficijent redukcije naprezanja  $K_{RN}$  kojim se prikazao omjer naprezanja poboljšane geometrije kuta otvora ( $r > 0$ ) sa geometrijom kuta otvora bez radijusa zaobljenja (pravi kut). Rezultati su pokazali da redukcija naprezanja raste sa porastom radijusa te opada sa porastom omjera veličine otvora ( $l/a$ ). Sami rezultati su očekivani, međutim, cilj studije bio je dobiti upravo vrijednosti redukcije naprezanja za određene parametre  $l/a$  i  $r/a$  kako bi se prilikom projektiranja moglo kvalitetno procijeniti koliko treba povećati (ili smanjiti) radijus zaobljenja kuta otvora da postignemo željenu razinu naprezanja. Bez rezultata studije, takva procjena bila bi iterativni postupak i uvelike bi ovisila o iskustvu projektanta.

Rezultati studije uspoređeni su sa rezultatima testiranja na globalnom 3D modelu broda za prijevoz žive stoke (novogradnja 526, ULJANIK). Izdvojen je detalj otvora vanjske oplata nadgrađa te je provedena analiza za nekoliko različitih geometrija kuta otvora. Globalni model broda imao je 4 slučaja opterećenja koji dobro opisuju opterećenje u naravi. Pokazalo se da studija provedena na parcijalnom 2D modelu otvora sa jednostavnim slučajem opterećenja daje vrlo točne procjene redukcije naprezanja. Pogreška u procjeni redukcije naprezanja za različite slučajeve opterećenja kreće se od 1 - 8 %.

Također, analizirana je i geometrija kuta otvora zvana „mišje uši“. To je relativno nova geometrija koja se pojavila na brodovima za kružna putovanja na otvorima za balkon. Rezultati su pokazali da geometrija nije toliko efikasna u redukciji naprezanja u odnosu na klasičnu geometriju kuta otvora poboljšanu radijusom. No, obzirom da i manji radijus poprilično smanjuje maksimalnu moguću ugradivu veličinu balkonskih vrata, geometrija kuta otvora „mišje uši“ idealna je za balkonske otvore jer svojom geometrijom ne utječe na moguću ugradivu veličinu balkonskih vrata, a redukcija naprezanja značajna je u odnosu na kut otvora bez radijusa (od 40 - 50 %).

## LITERATURA

- [1] M. Verdure, »Architectural digest,« Svibanj 2016. URL: <http://www.architecturaldigest.com/gallery/royal-caribbean-harmony-of-the-seas>.
- [2] D. Daničić, »Analiza čvrstoće različitih topoloških koncepata broda za kružna putovanja, Diplomski rad,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] J. Sorić, Metoda konačnih elemenata, Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga, 2004.
- [4] »iTCR,« URL: <http://itcr.hr/femap/femap/>.
- [5] »Siemens PLM Software,« Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2017. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/femap/>.
- [6] L. R. M. P. Devolopment, Structural Design Assessment, Primary Structure of Ro-Ro Ships, 2012.
- [7] B. Haraminčić, »Proračun konstrukcije roštilja dvodna broda metodom konačnih elemenata, Završni rad,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016..
- [8] »Design Expert,« Stat-Ease, Inc., URL: <http://www.statease.com/dx10.html>.
- [9] F. Kovačević, »Analiza čvrstoće različitih topoloških rješenja konstrukcije broda za prijevoz žive stoke, Diplomski rad,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [10] »Maestro Marine,« DRS Advanced Marine Technology Center, URL: <https://maestromarine.com/>.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disk**